



Elisa Pinheiro Alves

Licenciada em Ciências de Engenharia

Conceção, Produção e Validação Experimental de Micro Sondas de Correntes Induzidas Customizadas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Miguel Machado, Professor Doutor, FCT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Vogais: Prof. Doutor Luís Filipe Soldado Granadeiro
Rosado

Prof. Doutor Nuno Alberto Marques Mendes

Prof. Doutor Miguel Araújo Machado



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2020

Conceção, Produção e Validação Experimental de Micro Sondas de Correntes Induzidas Customizadas

Copyright © 2020 Elisa Pinheiro Alves

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a elaboração desta dissertação em especial:

Ao Professor Miguel Machado por toda a ajuda, dicas técnicas e esclarecimentos ao longo da investigação.

Aos técnicos e colegas do laboratório que me encaminharam e auxiliaram nas tarefas, destacando o Sr. António Campos e o Sr. Paulo Magalhães.

À minha família, pelo apoio que me deu, em especial à minha avó e à minha mãe, pelos valores que me inculcaram e porque o meu sucesso é produto do seu trabalho.

Aos meus irmãos por estarem sempre comigo.

Ao André, por toda a ajuda que me deu e pela sua paciência infinita. O meu obrigada por sempre acreditar em mim, por me animar quando preciso e por tornar tudo melhor.

A todos os amigos que fiz na faculdade, por me terem acompanhado nas noites sem dormir, por sempre me motivarem e nunca me deixarem desistir.

Gostaria ainda de agradecer o financiamento no âmbito do projeto PROBING, (Refª 40042), suportado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), Programa Operacional Regional de Lisboa (Lisb@2020 e Portugal2020).

RESUMO

Os Ensaios Não Destrutivos (END) por Correntes Induzidas (CI) permitem determinar características do material e detetar a presença de defeitos superficiais e subsuperficiais que podem ser prejudiciais à integridade estrutural em peças produzidas em materiais condutores de eletricidade. Apesar de ser uma técnica comum e com muitos anos de experiência acumulada, existem algumas condições onde persistem dificuldades, como é o caso da deteção de micro defeitos em componentes de reduzida dimensão ou com difícil acesso.

O objetivo deste trabalho foi conceber, simular numericamente, produzir e validar experimentalmente diferentes configurações das sondas de CI para: deteção de micro defeitos para cordões brasados a laser e deteção de defeitos em limas de Endodontia. Outro objetivo consistiu em desenvolver e aplicar melhorias numa mesa XY de alta resolução para inspeção automatizada permitindo, por exemplo, o mapeamento de condutividades de um componente com elevada resolução.

Foram simuladas numericamente, produzidas e caracterizadas sondas com diferentes geometrias, configurações e parâmetros. No total foram produzidas 19 sondas de CI que permitiram avaliar a importância de diferentes parâmetros no processo de inspeção.

Os resultados demonstraram o potencial das sondas helicoidais cilíndricas na inspeção de cordões brasados a laser: sondas com diferentes parâmetros mostraram-se capazes de detetar defeitos superficiais e subsuperficiais. Para a inspeção das limas endodônticas foram testadas as configurações desenvolvidas sendo que a sonda toroidal montada em modo bridge diferencial demonstrou ser capaz de detetar um defeito artificial na lima.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaios Não Destrutivos (END)

Correntes Induzidas (CI)

Micro Sonda

Micro Defeito

Limas de Endodontia

Cordão Brasado a Laser

ABSTRACT

Non-Destructive Testing (NDT) by Eddy Currents (EC) allows the determination of material characteristics and the detection of surface and subsurface defects that can be prejudicial to the structural integrity of pieces made of electrically conductive materials. Despite being a common technique with many years of accumulated experience, there are some conditions where difficulties persist, such as the detection of micro defects in small components or with difficult access.

The objective of this work was to design, numerically simulate, produce and experimentally validate different configurations of EC probes for: detection of micro defects on laser-brazed joints and detection of defects in Endodontic files. Another objective was to develop and apply improvements to a high resolution XY scanning device for automated inspection, allowing conductivity mapping with high resolution.

Numerically simulated, produced, and characterized probes with different geometries, configurations, and parameters. In total, 19 EC probes were produced which allowed to assess the importance of different parameters for the inspection process.

The results demonstrated the potential of helicoidal cylindrical probes in the inspection of laser-brazed joints: probes with different parameters proved to be capable of detecting surface and subsurface defects. For the inspection of endodontic files, the developed configurations were tested, and one demonstrated to be able to detect an artificial defect in the file.

KEY-WORDS

Non-destructive testing (NDT)

Eddy Currents (EC)

Micro probes

Micro defect

Endodontic Files

Laser Brazed Cord

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Resumo.....	vii
Palavras-Chave	vii
Abstract	ix
Key-Words.....	ix
Índice	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura.....	xix
1 - Introdução.....	1
1.1 - Estado da Arte e Motivação	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Metodologia	3
1.4 - Estrutura da Dissertação	3
2 - Revisão Bibliográfica	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Ensaios Não Destrutivos (END)	6
2.3 - Correntes Induzidas.....	6
2.3.1 - Fundamentos.....	6
2.3.2 - Limitações.....	10
2.3.3 - Correntes induzidas pulsadas (CIP)	10
2.3.4 - Tipos de Sonda.....	11
2.3.1 - Modo de funcionamento.....	12
2.3.2 - Modo de ligação	14
2.4 - Cordões brasados a laser	15
2.4.1 Métodos de END para inspeção de cordões brasados a laser	17
2.5 - Inspeção de Limas de Endodontia.....	18
2.5.1 - Métodos de END para limas de endodontia	19
2.5.2 - Caracterização dos Instrumentos de Estudo.....	24
2.6 Mapeamento de Condutividade	24
2.7 - Síntese do capítulo	25
3 - Metodologia.....	27
3.1 - Introdução	27
3.2 - Simulações Numéricas	28
3.3 - Conceção de bobinas	28
3.4 - Conceção do Chassis da Sonda e Montagem.....	32
3.5 - Caracterização de Sondas de CI	35
3.6 - Melhorias no Dispositivo de Posição - Mesa XY.....	37

3.7 - Desenvolvimento de Condições de Inspeção.....	40
4 - Simulação Numérica das Sondas de Correntes Induzidas	43
4.1 - Introdução	43
4.2 - Simulação numérica	44
4.3 - Síntese do Capítulo.....	47
5 - Validação experimental das Sondas de Correntes Induzidas	49
5.1 - Introdução	49
5.2 - Caracterização das Sondas com um Defeito Padrão	50
5.3 - Inspeção do Cordão Brasado a Laser	57
5.4 - Inspeção de Limas de Endodontia.....	62
5.5 - Mapeamentos de condutividades.....	71
5.6 - Síntese do capítulo	73
6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	77
6.1 - Introdução	77
6.2 - Conclusões.....	78
6.2.1 - Inspeção do cordão brasado a laser	78
6.2.2 - Inspeção lima de endodontia	78
6.3 - Propostas para Desenvolvimentos Futuros	79
Referências Bibliográficas	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [10].	7
Figura 2.2 – Relação entre a orientação dos defeitos e a trajetória das CI (a) alinhado com as CI, (b) perpendicular às CI, (c) perpendicular à superfície do material, (d) paralelo à superfície do material, adaptado de [1].	8
Figura 2.3 - Comportamento das CI junto dos limites do material (efeito de bordo) [3].	8
Figura 2.4 - Plano de impedância de Correntes Induzidas, adaptado de [12].	9
Figura 2.5 - Penetração de Correntes Induzidas, adaptado de [9].	10
Figura 2.6 - Micro bobina helicoidal [3].	11
Figura 2.7 – (a) Método de análise com sondas convencionais, (b) Micro Bobinas Matriciais [10].	12
Figura 2.8 – Sonda diferencial espiral plana com forma: (a) circular, (b) retangular [19].	12
Figura 2.9 – (a) Sinal característico de uma sonda absoluta; (b) sonda absoluta envolvente não equilibrada, adaptado de [8].	13
Figura 2.10 - (a) Sinal característico de uma sonda diferencial; (b) sonda diferencial envolvente de dupla função, adaptado de [8].	13
Figura 2.11 - Sondas de reflexão.	14
Figura 2.12 – Circuito RL para ligação de sondas absolutas, adaptado de [8].	14
Figura 2.13 - Ligação bridge para sondas absolutas, (a) desequilibrada; (b) equilibrada, adaptado de [8].	15
Figura 2.14 - Secção transversal do cordão e respetivos componentes, adaptado de [1].	15
Figura 2.15 - Diferentes tipos de imperfeições nos cordões brasados a laser, adaptado de [1].	16
Figura 2.16 - Superfícies do cordão afetadas por diferentes efeitos metálicos, adaptado de [23].	17
Figura 2.17 – Cordão de brasagem na industria automóvel, adaptado de [1]	18
Figura 2.18 – (a) Lima HyFlex na posição original, (b) Lima HyFlex deformada por pressão, (c) Lima HyFlex permanece na forma curva, [32]	20
Figura 2.19 - Representação da Lima HyFlex, (a) Antes do uso (b) Após uso [33]	20
Figura 2.20 - Tratamento térmico, (a) Lima HyFlex deformada, (b) Água aquecida a 55 °C, (c) Lima mergulhada na água aquecida [32].	21
Figura 2.21 – (a) Lima HyFlex após tratamento com a sua forma original, (b) Respetiva representação, adaptado de [32, 33].	21

Figura 2.22 - (a) Lima HyFlex após tratamento com a sua forma original, (b) Respetiva representação, adaptado de [32, 33] respetivamente.	21
Figura 2.23 - Comparação de resultados entre (a) limas com defeito e (b) limas sem defeito de termografias obtidas na bibliografia [3], (1) na fase de aquecimento, (2) fase de equilíbrio térmico, (3) fase de arrefecimento	22
Figura 2.24 - Montagem experimental para inspeção por CI usada na bibliografia [3].	23
Figura 2.25 – Representação esquemática para possível nova abordagem para montagem experimental, (imagem não está à escala).	23
Figura 2.26 - Representação de um instrumento endodôntico normalizado segundo a norma ISO, adaptado de [34]......	24
Figura 2.27 - Modelo usado para simular numericamente falhas [35]	25
Figura 3.1 - Bobina construída com auxílio do enrolador de bobinas, (a) sem shield, (b) com shield.	28
Figura 3.2 - Exemplo de invólucro com bobina já instalada.	29
Figura 3.3 - Representação da montagem para inspeção da lima com a sonda,(a) Semicircular, (b) Toroidal.	30
Figura 3.4 - Representação da cotagem para a: (a) Sonda W, (b) Sonda Z.	31
Figura 3.5 - Exemplo de micro bobina, (a) bobina helicoidal cilíndrica enrolada industrialmente, (b) com núcleo, (c) com núcleo e <i>shield</i> e (d) bobina montada com núcleo e <i>shield</i> montada no invólucro.....	32
Figura 3.6 – Chassi da sonda usada com as bobinas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente (a) montagem completa da sonda, (b) caixa da sonda, (c) tampa da sonda.	33
Figura 3.7 - Montagem dos diferentes elementos das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente.	33
Figura 3.8 - Sonda com geometria semicircular.	34
Figura 3.9 –(a) Montagem sonda Z, (b) modo absoluto, (c) modo diferencial.....	34
Figura 3.10 - Sonda helicoidal cilíndrica enrolada industrialmente.....	35
Figura 3.11 - Resultados do varrimento de frequências, (a) Sonda L – 400 enrolamentos, (b) Sonda C – 200 enrolamentos, (c) Sonda A – 100 enrolamentos.	36
Figura 3.12 –Mesa XY desenvolvida anteriormente na bibliografia [2], (a) CAD; (b) Montagem [2]......	38
Figura 3.13 – Montagem eletrónica da: (a) Mesa XY anteriormente desenvolvida, (b) Mesa XY melhorada.	38
Figura 3.14 – Scanner automatizado no plano XY e diferentes elementos.	39

Figura 3.15 – Furo A que assegura a ligação entre, (a) peça de ligação, (b) braço do micrómetro.	40
Figura 3.16 - Peças de ligação entre micrómetro e motor, (a) peça anteriormente desenvolvida, (b) conjunto de peças atualizadas.	40
Figura 3.17 – (a) Montagem utilizada na inspeção com as Sondas helicoidais cilíndricas, (b) Suporte Horizontal.....	41
Figura 3.18 - (a) Montagem utilizada na inspeção com as sondas com geometria circular, (b) Suporte Vertical.	42
Figura 4.1 – CAD do modelo utilizado nas simulações e componentes.	44
Figura 4.2 – Malha utilizada nas simulações numéricas: peça, sonda e proximidades.	45
Figura 5.1 - Montagem na Mesa XY para inspecionar material com defeito padrão.	50
Figura 5.2 - Comparação dos gráficos de impedância da sonda H, J, M, à frequência 3,5 MHz com igual ganho.	52
Figura 5.3 – Comparação dos gráficos de impedância da sonda H, J e M à frequência 3.5 MHz com ganhos diferentes para cada sonda.	53
Figura 5.4 - Comparação dos gráficos de impedância da sonda A e D, à frequência 1 MHz com igual ganho.	54
Figura 5.5 – Gráfico de impedância elétrica da sonda, (a) LT-200, (b) LT-400.	56
Figura 5.6 - Cordão brasado a laser e a localização do defeito superficial, defeito 1, defeito subsuperficial, defeito 2.....	58
Figura 5.7 - Montagem na Mesa XY.	58
Figura 5.8 - Gráfico de impedância elétrica da Sonda G, H, I, J e M com a representação da lima, localização do defeito e sonda.	60
Figura 5.9 - Gráfico de impedância elétrica da Sonda E, K, B, D e L; com a representação da lima, localização do defeito e sonda.	62
Figura 5.10 - Lima rotativa Hyflex CM 20/.04 [3].....	63
Figura 5.11 - Lima rotativa HyFlex CM 20/.04 e a localização do defeito introduzido artificialmente; (a) Vista de topo; (b) Vista lateral, adaptado de [3].....	63
Figura 5.12 - Montagem das Sondas helicoidais cilíndricas produzidas manualmente no braço da Mesa XY.	64
Figura 5.13 - Comparação dos gráficos de impedância das sondas diferenciais B, G, I, K.....	65
Figura 5.14 - Montagem para inspeção de limas de endodontia com a sonda helicoidal cilíndrica enrolada industrialmente.	66

Figura 5.15 - Variação da impedância elétrica registada nas sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente com designação (a) LT-400 e (b) LT-200 à sua frequência ótima com a representação da lima e sonda à escala.....	67
Figura 5.16 - Montagem para inspeção de Limas de endodontia com a Sonda com Geometria Semicircular.....	68
Figura 5.17 – Variação da Impedância elétrica no Ensaio A com a sonda semicircular a 2 MHz com o ganho máximo do instrumento de inspeção e representação da posição do defeito, lima e sonda.	68
Figura 5.18 - Comparação dos resultados da inspeção com a sonda semicircular no Ensaio A e Ensaio B a 2 MHz com ganho máximo no aparelho de inspeção com a representação da lima, localização do defeito e Sonda W.	69
Figura 5.19 - Montagem para inspeção de limas de endodontia com a Sonda toroidal.	70
Figura 5.20 - Variação da impedância elétrica registada com a Sonda Z montada (a) com uma bobina em modo absoluto e (b) com duas bobinas em modo diferencial com ganho máximo do aparelho de inspeção e frequência 2 MHz com a representação da lima, defeito e sonda.	71
Figura 5.21 - Placa de teste criada para mapeamento de condutividades e representação, a vermelho, da área inspecionada.	72
Figura 5.22 - Montagem na Mesa XY da placa para mapeamento de condutividades.	72
Figura 5.23 – Comparação entre: (a) região inspecionada e (b) resultados da parte real da indutância resultante do ensaio com a sonda helicoidal cilíndrica com 200 enrolamentos a frequência 2 MHz com algumas das regiões de interesse assinaladas.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Técnicas de END para a inspeção de cordões brasados a laser.	17
Tabela 2.2 - Desafios na aplicação de CI para detecção de defeitos nas limas de endodontia ...	23
Tabela 3.1 - Características bobinas desenvolvidas e suas denominações.	29
Tabela 3.2 - Características da sonda com geometria toroidal, Sonda Z, e sonda com geometria semicircular, Sonda W.	30
Tabela 3.3 - Características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente.	31
Tabela 3.4 - Frequência ótima em MHz para as sondas desenvolvidas.	37
Tabela 4.1 – Sumário dos parâmetros utilizados nas simulações.	45
Tabela 4.2 - Influência da altura do <i>shield</i> nos ensaios de CI.	83
Tabela 4.3 - Influência da altura do Núcleo nos ensaios de CI.	84
Tabela 4.4 - Influência da mesma altura do Shield e do Núcleo nos ensaios de CI.	85
Tabela 5.1 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com 20 enrolamentos utilizadas na inspeção ao defeito padrão.	51
Tabela 5.2 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com 100 enrolamentos utilizadas na inspeção ao defeito padrão.	53
Tabela 5.3 - Representação e características das sondas enroladas industrialmente utilizadas na inspeção ao defeito padrão.	55
Tabela 5.4 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente utilizadas na inspeção ao Defeito Superficial.	59
Tabela 5.5 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente utilizadas na inspeção ao Defeito Superficial.	61

NOMENCLATURA

Nomenclatura Grega

\varnothing	Diâmetro [m]
δ	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
σ	Condutividade elétrica [S·m ⁻¹] ou [% IACS]
μ	Permeabilidade magnética [H·m ⁻¹]

Nomenclatura Latina

\vec{Z}	Vetor impedância elétrica [Ω]
f	Frequência [Hz]
I_0	Densidade de correntes na superfície [A/m ²]
I_x	Densidade de correntes a x m de profundidade [A/m ²]
x	Profundidade [m]
X	Reactância [Ω]
X_L	Reactância Indutiva [Ω]
X_C	Reactância capacitiva [Ω]

Siglas e Acrónimos

DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
H _p	Campo magnético primário
H _s	Campo magnético secundário
IACS	<i>International Annealed Copper</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
MEF	Método Elementos Finitos
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PEC	Correntes Induzidas Pulsadas
R	Resistência [Ω]
UNL	Universidade Nova de Lisboa
US	Ultra-sons

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Estado da Arte e Motivação

Com a evolução da tecnologia e dos processos de fabrico, a necessidade de validação dos mesmos é constante. Não só no caso de componentes cujo funcionamento é crítico, mas também para assegurar a qualidade geral do processo. Os Métodos de Ensaio Não Destrutivos (END) permitem averiguar se estes componentes realmente cumprem os requisitos para que foram projetados, sendo possível fazê-lo sem pôr em causa a integridade da peça que se pretende inspecionar. Os END permitem determinar características do material e presença de defeitos prejudiciais à sua integridade mecânica sem alterar as suas propriedades e permitindo a sua posterior utilização.

Os ensaios de Correntes Induzidas (CI), sendo estes uma técnica de END, permitem detetar defeitos subsuperficiais e superficiais nos materiais condutores de eletricidade. Para aumentar a sensibilidade das sondas de CI podem ser utilizadas duas bobinas idênticas com ligação *bridge* diferencial sendo que os resultados são obtidos pela comparação da impedância entre as duas bobinas [1].

Uma necessidade concreta de END consiste em inspecionar os cordões brasados a laser que são cada vez mais frequentes na indústria automóvel para realizar a ligação dos painéis laterais com o tejadilho [1].

Dadas as especificações do cordão como a sua largura, aproximadamente 2 mm, a sua geometria e o difícil acesso às sondas a usar na inspeção, estas devem ter características específicas, nomeadamente pequenas dimensões e devem ser otimizadas para inspecionar o material de adição. Sondas com estas características não estão disponíveis comercialmente [1] sendo assim necessário adaptar sondas com estas características.

As características destas sondas fazem com que estas tenham grande potencial de utilização em inspeção de materiais de pequenas dimensões. Por exemplo cordões brasados a laser utilizados na indústria automóvel, material médico e caracterização de pequenas áreas de materiais processados [2].

O dimensionamento destas sondas torna-se um importante tema de investigação dadas as características específicas das sondas e as potenciais utilizações. Este dimensionamento já foi anteriormente desenvolvido no documento [1] onde foi projetada uma sonda com dois pares de bobinas com ligação *bridge* para inspeção de cordões brasados a laser usados na indústria automóvel. Em cada par de bobinas uma delas é colocada sobre o cordão e outra sobre uma soldadura em boas condições, que é usada como referência. Este trabalho mostrou já grande avanço na conceção deste tipo de sondas, no entanto há ainda vários parâmetros a considerar tais como dimensões relativas ao *shield* e ao núcleo face aos enrolamentos.

1.2 - Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de sondas de CI de reduzida dimensão para aplicações com alguma especificidade. Uma aplicação consiste na inspeção de cordões brasados a laser usados na ligação de painéis na indústria automóvel onde é necessário avaliar a presença de micro defeitos para garantir a integridade estrutural da ligação [1].

Estas sondas com a adição de outras desenvolvidas especificamente para inspeção de instrumentos de endodontia, vão ser também utilizadas na deteção de micro defeitos em limas de endodontia de Níquel-Titanio, HiFlex™ EDM permitindo a sua posterior utilização [3].

Um objetivo secundário consiste em realizar melhoramentos ao nível de *software*, *hardware* e componentes mecânicos da mesa de controlo e movimento de sondas nos eixos X e Y com

precisão ao micrómetro, Mesa XY, para tornar a deteção de micro defeitos em limas de endodontia possível e mapeamento de condutividades.

1.3 - Metodologia

Tendo em conta os objetivos propostos foi realizada uma pesquisa bibliográfica na área dos END em especial a técnica de CI e ainda às técnicas e procedimentos mais utilizados na inspeção de cordões brasados a laser, inspeção a limas de endodontia e as principais dificuldades encontradas nos procedimentos utilizados.

Foram concebidas sondas customizadas próprias para detetar micro defeitos nos cordões brasados a laser e limas de endodontia.

Para perceber o impacto dos diferentes parâmetros da sonda foi usado um software de simulação numérica onde os fenómenos eletromagnéticos como a direção e a intensidade das CI são simulados para as diferentes características do defeito. Após a conceção, simulação, produção e caracterização das sondas estas foram validadas experimentalmente.

Para proceder aos ensaios, foram realizadas alterações no scanner automatizado desenvolvido no documento [2], Mesa XY, para permitir o controlo preciso de sondas.

1.4 - Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, nos quais são abordados todos os aspetos relevantes para o desenvolvimento do trabalho proposto.

No Capítulo 1 é realizada uma introdução ao trabalho a ser desenvolvido começando pelos objetivos pretendidos, a motivação subjacente à dissertação e a metodologia utilizada.

O Capítulo 2 é reservado para os fundamentos teóricos e revisão do estado de arte. São analisados os princípios físicos e estudos científicos mais relevantes no campo de END, em especial por CI, os defeitos mais comuns nos cordões brasados a laser e os estudos desenvolvidos nesta área e na da inspeção de limas de endodontia.

A metodologia ao longo de todo o trabalho está desenvolvida no Capítulo 3. Optou-se por dividir este capítulo em sete partes: no subcapítulo §3.2 são definidas as características das sondas a simular numericamente; em §3.3 é desenvolvido o procedimento de conceção de bobinas; no subcapítulo §3.4 é descrito o processo de conceção e montagem laboratorial das sondas; no subcapítulo §3.5 é descrito o aparato laboratorial para caracterizar as bobinas

desenvolvidas; em §3.6 são descritas todas as necessidades de melhoria na Mesa XY; e por último, no subcapítulo §3.7, é descrito o desenvolvimento de componentes necessários para garantir as condições de inspeção.

O Capítulo 4 é reservado à simulação numérica das sondas de correntes induzidas. A simulação numérica é realizada no programa Ansys Electronics onde os resultados estão apresentados no subcapítulo §4.2 e a discussão destes no subcapítulo seguinte, §4.3.

A validação experimental das sondas é apresentada no Capítulo 5 e está dividida em 3 partes: em §5.2 é descrita a caracterização das sondas com um defeito padrão, em §5.3 são apresentados os resultados e discussão de resultados na inspeção de defeitos introduzidos artificialmente num cordão brasado a laser, no subcapítulo §5.4 são comparados os resultados obtidos para as diferentes sondas na inspeção da lima rotativa Hyflex CM 20/.04 com uma defeito inserido artificialmente.

No Capítulo 6 e último são apresentadas as conclusões mais relevantes de cada capítulo e sugestões para desenvolvimentos futuros deste trabalho.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos teóricos e estado de arte relativo aos temas que serão discutidos e desenvolvidos na elaboração da presente dissertação, sendo por isso dividido em duas partes.

No capítulo §2.2 são abordados os vários tipos de Ensaio Não Destrutivo em especial ao método de Correntes Induzidas e os seus fundamentos e limitações. Ainda nesta parte são analisados os diferentes tipos de sondas, os seus modos de funcionamento e modos de ligação.

De seguida é feita a análise aos cordões brasados a laser usados na indústria automóvel e às limas de endodontia, apresentando-se os defeitos mais comuns e uma análise aos métodos de inspeção mais adequados a cada caso.

É também realizada uma introdução ao tema de mapeamento de condutividades através da técnica de CI.

2.2 - Ensaios Não Destrutivos (END)

Os Ensaios Não Destrutivos (END) permitem a inspeção de materiais e componentes sem alterar as suas características e permitir o seu posterior funcionamento. A técnica mais apropriada a usar depende do material a inspecionar, das características do defeito, da sua acessibilidade e das condições de inspeção [1].

A classificação dos END pode ser feita em função:

- Da aplicação: se os métodos são usados para a deteção de defeitos, caracterização de materiais ou metrologia;
- Dos princípios físicos associados ao método: ondas eletromagnéticas, ondas acústicas, emissão de radiação ou outros como a absorção ou a capilaridade;
- Da capacidade de deteção sendo assim divididos por ensaios volumétricos se permitem avaliar todo o volume da peça como no caso dos Raios-X e Ultra-Sons; ensaios subsuperficiais se avaliam parte da peça como o método de Partículas Magnéticas e Correntes Induzidas a baixas frequências ou ensaios superficiais se avaliam apenas a superfície do material como nos ensaios por Líquidos Penetrantes ou Correntes Induzidas a altas frequências [4].

2.3 - Correntes Induzidas

A técnica de correntes induzidas pode ser utilizada para medir condutividades elétricas [5] e permeabilidades magnéticas [6], detetar defeitos [4], detetar e analisar corrosão no material [7] e medir espessuras de revestimentos [8].

Este método tem um campo de aplicação abrangente em materiais condutores elétricos e torna possível a deteção de pequenos defeitos com resultados imediatos, com equipamento portátil não sendo necessário o contacto com a peça [3], [4], [9].

O ensaio pode ser automatizado e incluído nas linhas de produção [2].

2.3.1 - Fundamentos

As inspeções por correntes induzidas são um dos métodos de ensaios não destrutivos (END) que se baseia no princípio do eletromagnetismo para inspecionar equipamentos.

A corrente elétrica da bobina cria o campo magnético primário (H_p) (**Figura 2.1 – a**) que na presença de material condutor induz correntes elétricas alternadas na peça, (**Figura 2.1 – b**), que irão criar um campo magnético secundário (H_s), contrário ao primário (**Figura 2.1 – c**).

As correntes induzidas circulam em planos perpendiculares ao fluxo magnético, normalmente paralelo ao enrolamento da bobina.

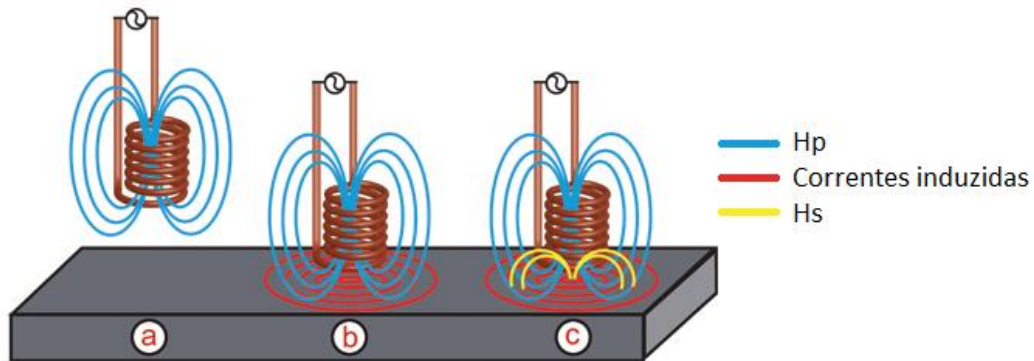


Figura 2.1 - Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [10].

As CI vão apresentar sempre a mesma direção se o material for aproximadamente homogêneo e isotrópico, logo na existência de defeitos, há perturbações na tentativa de o contornar e a sua trajetória vai ser alterada. No entanto quando o defeito tem a mesma direção das CI, **Figura 2.2 – a**, a deflexão é praticamente inexistente sendo por isso mais difícil de os detetar, ocorrendo o oposto para os defeitos perpendiculares à trajetória das CI, **Figura 2.2 – b**. A orientação dos defeitos em relação à superfície também vai ter impacto na sua detetabilidade sendo que os defeitos perpendiculares, **Figura 2.2 – (c)**, serão mais dificilmente detetados que os paralelos, **Figura 2.2 – (d)**.



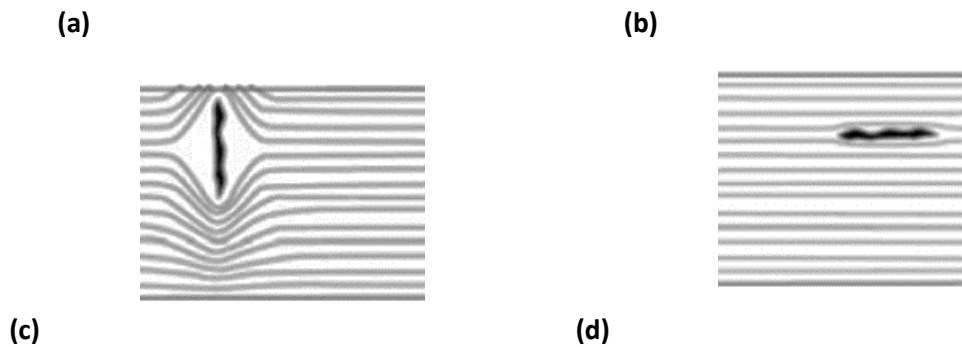


Figura 2.2 – Relação entre a orientação dos defeitos e a trajetória das CI **(a)** alinhado com as CI, **(b)** perpendicular às CI, **(c)** perpendicular à superfície do material, **(d)** paralelo à superfície do material, adaptado de [1].

Devido ao efeito de bordo há uma dificuldade acrescida em localizar defeitos próximos do limite do material por as CI se comportarem com fluídos compressíveis, **Figura 2.3**.

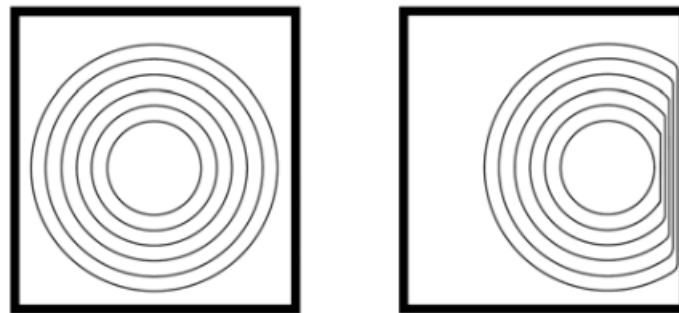


Figura 2.3 - Comportamento das CI junto dos limites do material (efeito de bordo) [3].

A impedância elétrica do sistema, Z [Ω], irá ser definida pela Equação **(2.1)**, onde a parte imaginária é a reactância, X [Ω], oposição à variação de corrente, e a parte real a resistência, R [Ω], a energia gasta em forma de calor.

$$Z = R + jX \quad (2.1)$$

Quando em contacto com o material, as correntes induzidas que estão a ser geradas irão tirar energia à bobina sendo medido por parte da sonda uma maior resistência.

O comportamento da impedância irá ser diferente para materiais não ferromagnéticos e ferromagnéticos, sendo que nos primeiros o campo magnético no material contraria o da bobina resultando num campo menor com menos capacidade de induzir correntes resultando em menor reactância, enquanto que num material magnético, por este ter uma menor resistência à formação de campo magnético, o campo da bobina vai ser mais intenso induzindo assim mais

corrente e aumentando a reactância [12]. As discontinuidades são classificadas pelo plano de impedância, **Figura 2.4**.



Figura 2.4 - Plano de impedância de Correntes Induzidas, adaptado de [12].

A densidade de correntes, I_x , $[A/m^2]$, a uma profundidade x , $[m]$, é relacionada com a densidade das correntes na superfície, I_0 , $[A/m^2]$, a frequência, f , $[s^{-1}]$, a permeabilidade magnética, μ , $[H/m]$ e a condutividade elétrica, σ , $[S/m]$, na Equação (2.2). A densidade das correntes é maior na superfície da peça decrescendo exponencialmente com o aumento de profundidade, este fenómeno tem o nome de efeito de pele.

A profundidade de penetração, δ , $[m]$, é determinada pela Equação (2.3). Para um material com espessura uniforme, a profundidade máxima padrão é definida pela profundidade onde a densidade da corrente elétrica diminui pelo fator de $1/e \approx 37\%$ [13].

$$I_x = I_0 * e^{-x\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.2)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.3)$$

Para frequências mais altas há maior densidade de correntes induzidas na superfície, mas menor profundidade de penetração sendo por isso indicado para deteção de defeitos superficiais. Enquanto que, com frequências mais baixas existem correntes induzidas a uma maior profundidade e com uma menor densidade, sendo mais indicado para a deteção de defeitos subsuperficiais, como é verificado na **Figura 2.5**. [1,6,7]

Profundidade de Penetração de Correntes Induzidas

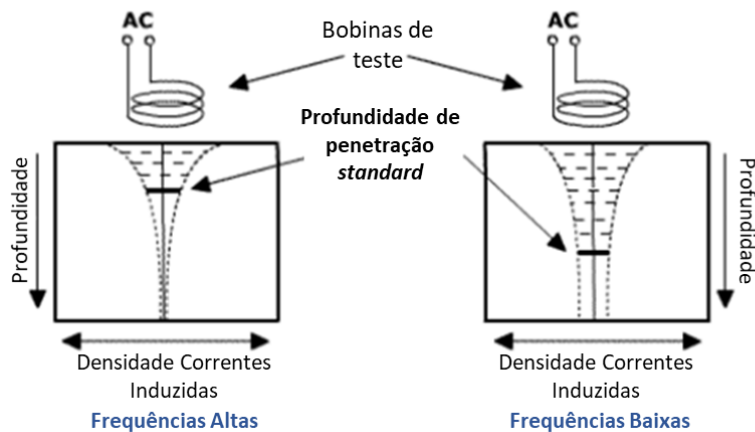


Figura 2.5 - Penetração de Correntes Induzidas, adaptado de [9].

2.3.2 - Limitações

A técnica de CI só pode ser utilizada em materiais condutores e é sensível a alterações na posição da sonda em relação à superfície a testar, efeito *lift-off*, por alterar a impedância medida entre os terminais da bobina que pode esconder sinais dos possíveis defeitos [4], [8], [9]. O efeito de bordo também pode influenciar o resultado dos ensaios e ofuscar possíveis falhas.

A superfície a inspecionar deve estar desimpedida para o uso da sonda e devido ao efeito de pele a técnica não é adequada para detetar defeitos em volume [1].

É necessário operadores mais experientes comparativamente às outras técnicas e de definir os valores de referência [6].

2.3.3 - Correntes induzidas pulsadas (CIP)

Usada especialmente na indústria da energia nuclear [8] e aeronáutica [14], [15] as correntes são excitadas por onda quadrada que com um único passo permite obter mais informação do que com excitação multifrequências [16].

Com CIP é possível obter uma maior profundidade de detecção, mais informação sobre defeitos no material [16], menos interferências e é possível diminuir o consumo energético, o que pode ser vantajoso na utilização do método com instrumentos portáteis [17][14][18].

2.3.4 - Tipos de Sonda

No desenvolvimento de novas sondas o objetivo é aumentar o limiar de detetabilidade de defeitos e aumentar a velocidade de inspeção.

As sondas podem ter diferentes configurações e modos de operação dependendo da maneira como os fios estão enrolados e a interferência com o equipamento de medida.

Método convencional – sondas axissimétricas e helicoidais

São utilizadas para a detecção de defeitos na superfície e para operar em várias frequências. Podem ter hastes flexíveis para se adaptarem a diferentes geometrias [10]. Compostas por uma bobina integrada no seu corpo, são de pequeno volume e reduzido peso e admitem a integração em componentes sem afetar a sua integridade. A sua configuração é facilmente alterada sendo possível alterar o diâmetro da bobina sem alterar o número de enrolamentos.



Figura 2.6 - Micro bobina helicoidal [3].

Bobinas matriciais

Esta configuração permite várias bobinas lado a lado excitadas sincronamente funcionando como uma sonda só. É possível inspecionar áreas maiores com uma só passagem o que se traduz em velocidades de inspeção maiores, **Figura 2.7**, com uma elevada resolução e resultados em forma de gráfico C-scan. No entanto são necessários equipamentos mais complexos e caros [6,7].



Figura 2.7 – (a) Método de análise com sondas convencionais, (b) Micro Bobinas Matriciais [10].

Sondas com Bobinas Espirais Planas

Composta por um sensor planar indutivo e um gerador de campo magnético. Podem ter forma variada e tem maior sensibilidade a falhas, devido à diminuição do *lift-off*. São produzidas em PCB e são facilmente integradas na peça a inspecionar podendo ser impresso em substrato flexível,[2]. Características da sonda como relação entre dimensões, orientação da bobina e diâmetro do fio são fáceis de variar.

As sondas podem ser produzidas com variadas formas, **Figura 2.8**. Sondas com forma retangular possuem vantagens como a possibilidade de serem produzidas com menor dimensão, geralmente com boa resposta a falhas longas e menor sensibilidade ao efeito de bordo [1].

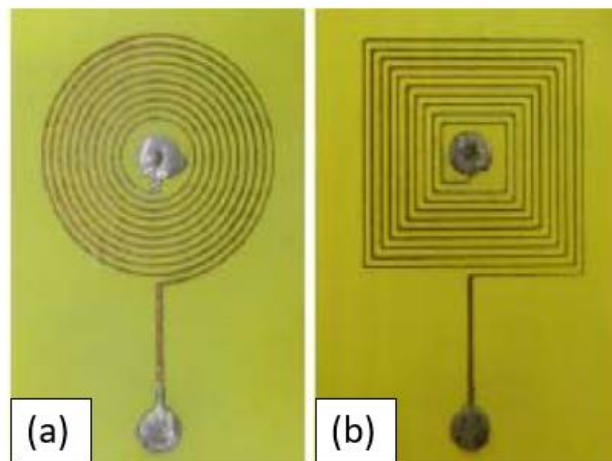


Figura 2.8 – Sonda diferencial espiral plana com forma: (a) circular, (b) retangular [19].

2.3.1 - Modo de funcionamento

Modo absoluto

Existe apenas uma bobina em contacto com a peça a inspecionar que funciona como elemento de excitação e receção, **Figura 2.9**. Os resultados são obtidos pela variação de impedância total.

Quando o valor da indutância não se aproxima o suficiente ao valor de referência, não é possível calibrar corretamente a sonda, aumentando o ruído e resultando numa fraca performance impossibilitando a leitura correta dos resultados. [5–7]

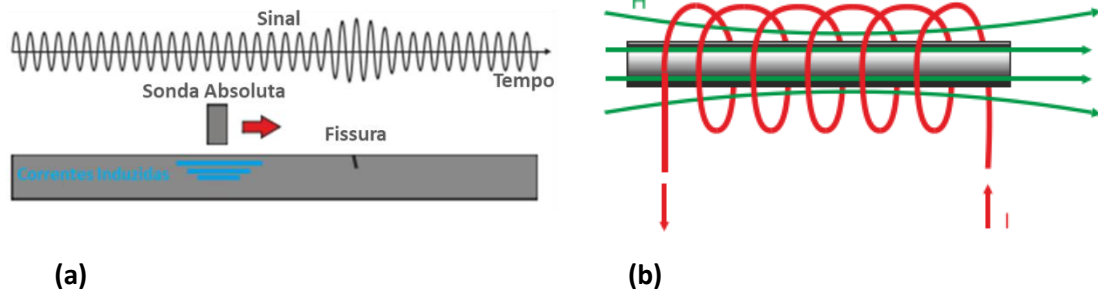


Figura 2.9 – (a) Sinal característico de uma sonda absoluta; (b) sonda absoluta envolvente não equilibrada, adaptado de [8].

Modo diferencial

Composta por duas bobinas, uma de emissão outra de recepção, colocada num padrão junto à primeira com o enrolamento oposto, **Figura 2.10**.

Os resultados são obtidos pela diferença de voltagem das duas bobinas. Geralmente este tipo de sistema apresenta melhor relação sinal/ruído do que o modo absoluto [2]. No entanto, na inspeção de uma falha longa, a sonda diferencial pode indicar apenas o início e fim da falha ao contrário da sonda absoluta que indicaria o seu comprimento total. [3]

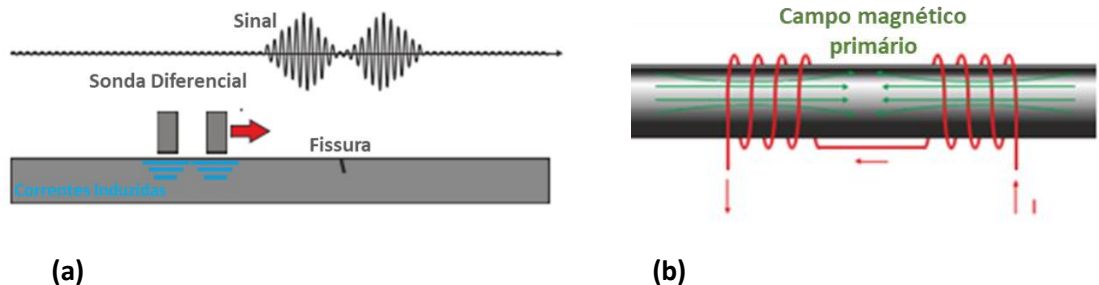


Figura 2.10 - (a) Sinal característico de uma sonda diferencial; (b) sonda diferencial envolvente de dupla função, adaptado de [8].

Modo de reflexão

Sondas de reflexão são compostas por duas bobinas onde uma induz CI no material a inspecionar e a outra funciona como sensor. Podem usar um maior domínio de frequências de excitação e possuem maior sensibilidade do que sondas absolutas.

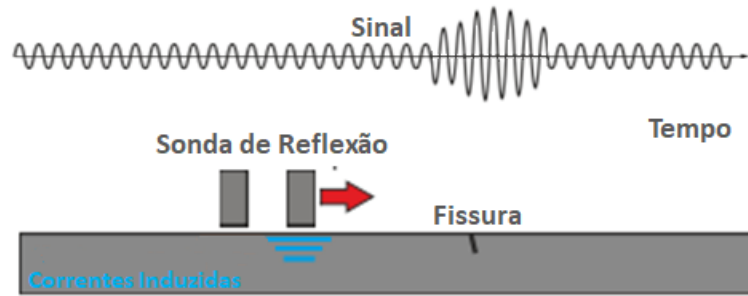


Figura 2.11 - Sondas de reflexão.

2.3.2 - Modo de ligação

Circuito RL

O método mais simples para fazer a ligação de sondas absolutas é com um circuito RL onde é possível obter leituras de voltagem, **Figura 2.12**, tendo como desvantagem a sua sensibilidade a alterações de temperatura.

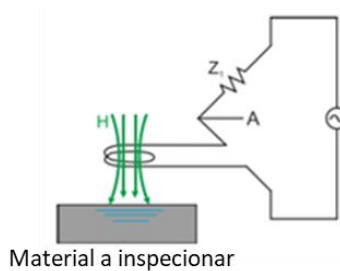


Figura 2.12 – Circuito RL para ligação de sondas absolutas, adaptado de [8].

Ligação *Bridge*

A ligação mais usada [8] é, no entanto, a ligação tipo *bridge*, que pode ser equilibrada ou desequilibrada.

Quando desequilibrada as sondas absolutas podem ser usadas em série com a resistência, como é representado na **Figura 2.13 – (a)**. A diferença de potencial é medida entre duas ramificações, o que permite usar mais instrumentos que num circuito RL mas a temperatura não é compensada e por isso a bobina vai ter coeficientes de temperatura diferentes [8].

Se a ligação for equilibrada ou de sondas diferenciais além de compensar a temperatura é lida a diferença de voltagem entre as duas bobinas tornando-a mais sensível. As bobinas são ligadas em série com uma resistência e em paralelo uma com a outra, representado na

Figura 2.13 – (b). Se a ligação for feita de modo a que uma bobina se encontre em contacto com o material a inspecionar e outra com o material de referência a sonda terá ainda mais sensibilidade. [19, 20]

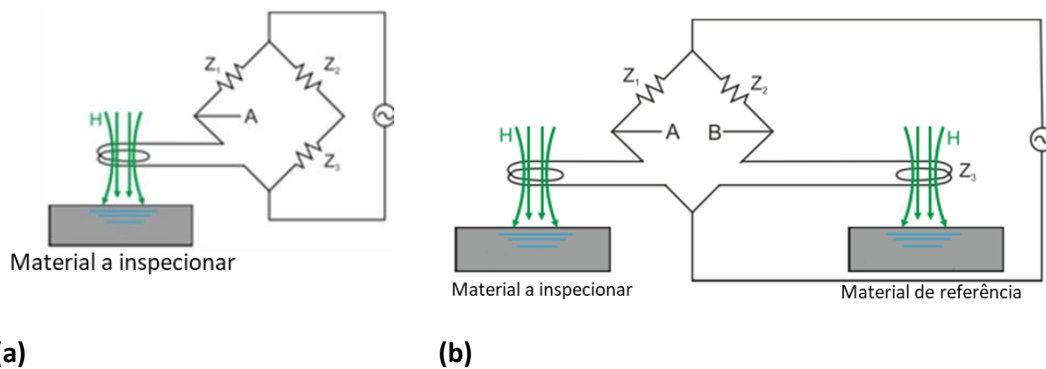


Figura 2.13 - Ligação bridge para sondas absolutas, **(a)** desequilibrada; **(b)** equilibrada, adaptado de [8].

2.4 - Cordões brasados a laser

A brasagem a laser está fortemente estabelecida na indústria automóvel por permitir a produção de cordões que cumprem altos requisitos de qualidade [20], melhorar a produtividade e eficiência de custos [21]. Esta tecnologia já é usada nos principais fabricantes de automóveis [21].

A ligação, representada na **Figura 2.14**, é feita entre duas superfícies curvas de aço, o painel lateral e o tejadilho, ambos de aço, com um cordão de uma liga de cobre. Sendo uma ligação intermetálica vários métodos, como a soldadura de arco e TIG, não se mostram adequados [1] enquanto métodos como a fricção linear, a fricção explosiva e *diffusion bonding*, *magnetic pulse welding* são indicados para ligações intermetálicas mas desaconselhados para produção em massa por ser necessário preparação excessiva inicial de superfícies, altas perdas de material e intervalo de parâmetros reduzido [1].

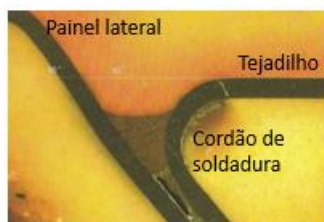


Figura 2.14 - Secção transversal do cordão e respetivos componentes, adaptado de [1].

Com a brasagem a laser são obtidos cordões duradouros, dúcteis e sem necessidade de vedação adicional com temperaturas de processamento baixas e um *input* de calor localizado que torna o impacto térmico no material de base e a distorção térmica do material de adição mínimo.

Este processo é muito dependente da automatização, que devido à alta qualidade pretendida nestas aplicações, o controlo automático mostrou-se essencial [20]. Estas características tornam o processo muito utilizado em componentes visíveis da indústria automóvel [22].

No entanto podem surgir imperfeições na ligação se houver fusão do material base ou formação de compostos intermetálicos frágeis.

Para controlar a qualidade do cordão é importante classificar e estudar os seus mecanismos de formação. Os defeitos podem ocorrer na geometria do cordão como: ocorrência esporádica de poros, inclui pequenos poros, poros grandes ou aglomerados de poros (1ª coluna - Figura 2.15); interrupções no cordão como grandes cavidades, descontinuidades do cordão, falta de ligação unilateral (2ª coluna - Figura 2.15); irregularidades na superfície na forma de degrau ou ondas ou partes de material de adição não fundidas, (3ª coluna - Figura 2.15) [23].

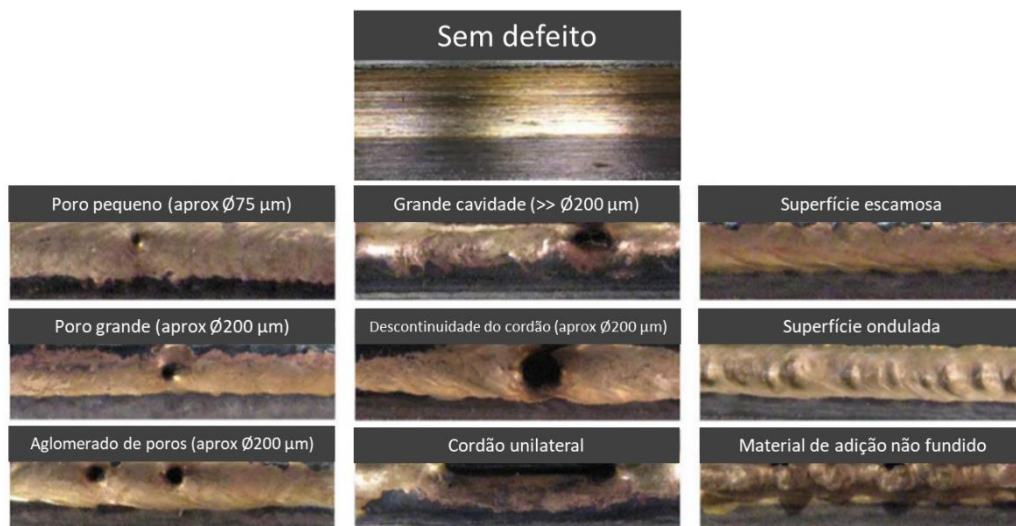


Figura 2.15 - Diferentes tipos de imperfeições nos cordões brasados a laser, adaptado de [1].

Também é possível identificar defeitos que afetam a aparência da superfície sem necessariamente ter impacto na geometria do cordão, normalmente estes tipos de defeitos estão relacionados com a composição do cordão. Na **Figura 2.16** estão representadas as superfícies e a secção lateral de um cordão sujeito a oxidação e separação de elementos no

material de ligação (2ª coluna) e um cordão afetado pela fusão parcial do material base (3ª coluna) comparativamente a um cordão sem defeitos (1ª coluna). Este tipo de imperfeições têm uma baixa influência na rigidez do cordão [23] e por isso vai ser dada mais importância aos defeitos na geometria do cordão referidas anteriormente.

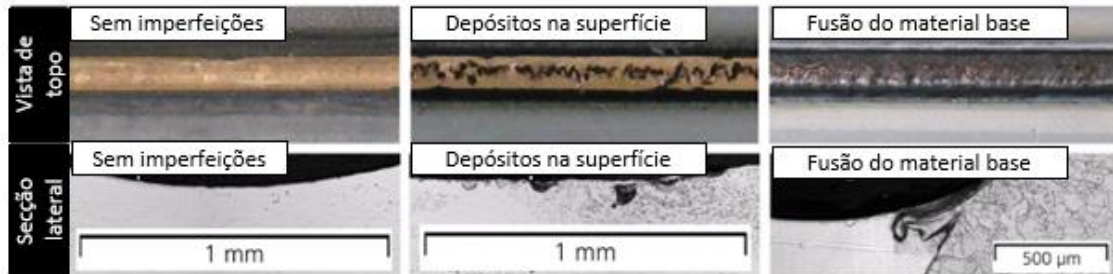


Figura 2.16 - Superfícies do cordão afetadas por diferentes efeitos metálicos, adaptado de [23].

2.4.1 Métodos de END para inspeção de cordões brasados a laser

Para inspeção dos cordões brasados a laser é necessário um método de END apropriado para a deteção de defeitos na superfície ou com pequena profundidade visto que o cordão terá pouca espessura. Na **Tabela 2.1**, foram analisadas as técnicas de END que poderiam ser usadas para a inspeção pretendida e as respetivas vantagens e desvantagens mais relevantes para este caso de estudo.

Tabela 2.1 - Técnicas de END para a inspeção de cordões brasados a laser.

Método END	Vantagens	Limitações
Líquidos penetrantes	Utilizado em gama vasta de materiais Permite deteção de pequenas discontinuidades	Deteção exclusiva de discontinuidades abertas à superfície
Ultra-sons	Elevado poder de penetração Sensibilidade elevada para deteção de defeitos pequenos	Difícil de aplicar em peças com espessura muito baixa Apresenta dificuldade na interpretação de defeitos superficiais Para matérias com fundos irregulares o ensaio está sujeito a ecos laterais que impossibilitam deteção de defeitos
Raios-X	Informações claras fáceis de interpretar	Reduzida sensibilidade de deteção de defeitos planos Custos elevados Resultados não instantâneos

Concluindo, a técnica de líquidos penetrantes é apropriada apenas para a deteção de discontinuidades na superfície tornando-se incompleta para a inspeção necessária. A técnica de Ultra-Sons tem uma fraca interpretação de resultados para discontinuidades superficiais e

não é apropriada para peças com fundos irregulares, como é o caso do cordão com a secção representada na **Figura 2.17**. Os Ultra-Sons detetam ondas refletidas nas superfícies laterais e é obtida uma resposta inexata, tendo pouca aplicabilidade para o fim pretendido. Por último a técnica de Raios-X também se mostrou pouco apropriada por ter custos elevados e os resultados não serem instantâneos. A técnica de CI por apresentar bons resultados na deteção de defeitos superficiais e subsuperficiais e por apresentar resultados instantâneos é a mais adequada para o caso de estudo.

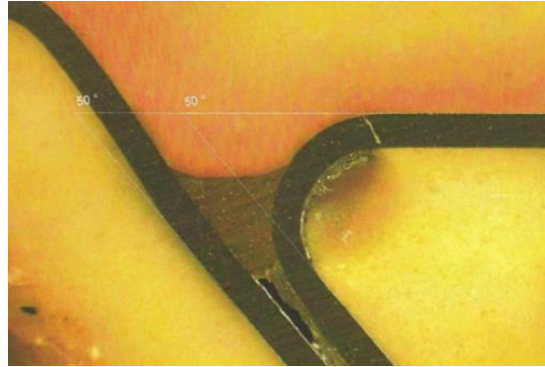


Figura 2.17 – Cordão de brasagem na indústria automóvel, adaptado de [1]

2.5 - Inspeção de Limas de Endodontia

Para o sucesso do tratamento endodôntico é necessária a remoção total de tecidos desvitalizados do canal radicular obtendo um formato cônico afunilado semelhante à sua forma original [24].

Para o preparo do canal radicular a preparação manual foi substituída por técnicas de modelagem automatizadas para o qual novos instrumentos são frequentemente introduzidos no mercado para maior rapidez e facilidade no tratamento [25]. Novas limas de liga de Níquel e Titânio (Ni-Ti) com memória de forma e superelasticidade têm sido apresentadas e manufaturadas por atingem melhor os parâmetros necessários para limpar e preservar a anatomia do canal radicular em comparação às limas de aço inoxidável [26].

A fratura dos instrumentos podem ocorrer por dois mecanismos, torção e fadiga cíclica [27]. A fratura por torção ocorre quando uma parte do instrumento é bloqueada, mas o seu eixo ainda se encontra em rotação ultrapassando o limite elástico do material e deformando plasticamente até a lamina fraturar [27]. A fadiga cíclica ocorre quando o instrumento está sujeito a ciclos alternados de tensão/compressão enquanto fletidos, sendo origem a

microfissuras na zona de concentração de tensões onde já poderiam existir defeitos superficiais que são propagadas por cada ciclo a que é sujeito [28].

A causa mais comum de fratura não é clara embora as várias investigações conduzidas para o efeito, no entanto o modo de fratura está relacionada com a secção transversal, composição química, processo de fabrico e tipo de tratamento térmico da lima [29]. Foi verificado que o tipo de fratura pode também estar relacionado com o diâmetro da lima, sendo que não é comum que limas com diâmetros maiores fraturem por torção por terem maior volume e conicidade e assim o momento necessário para as fraturar é maior do que comparativamente às limas com menor diâmetro. No entanto a fratura cíclica é mais comum em limas com maior diâmetro [27]. A pressão exercida pelo operador durante o tratamento também influencia o tipo de fratura, sendo que maior pressão irá provocar fratura por torção enquanto menor pressão irá provocar mais ciclos de tensão/compressão acelerando o processo de fadiga [30].

2.5.1 - Métodos de END para limas de endodontia

A maior preocupação na utilização destes instrumentos é a fratura inesperada que pode ocorrer sem apresentar deformação permanente anterior ou defeitos visíveis, o que torna a inspeção visual insuficiente para avaliar a condição dos instrumentos [27].

As limas exibem efeito térmico de memória e superelasticidade, o que permite que durante o procedimento, o formato das limas HyFlex seja alterado para facilitar o acesso a canais radiculares extremamente curvos [31], representado na **Figura 2.18**, ou para prevenir a acumulação de stress nas suas espiras [32], como pode ser verificado na **Figura 2.19** onde está representada a lima antes e depois do seu uso.

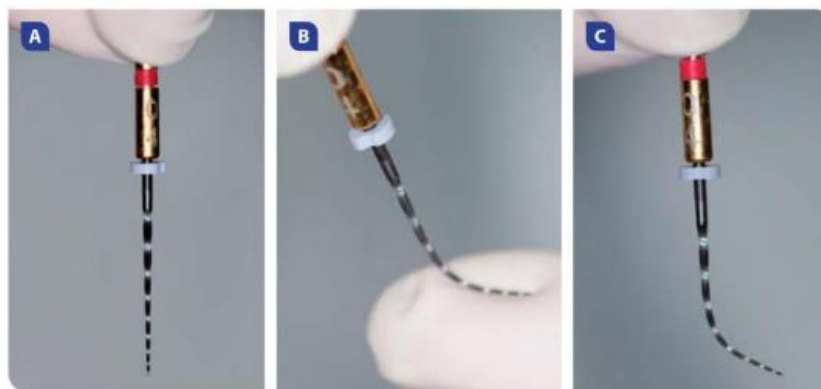


Figura 2.18 – (a) Lima HyFlex na posição original, (b) Lima HyFlex deformada por pressão, (c) Lima HyFlex permanece na forma curva, [32]



(a)

(b)

Figura 2.19 - Representação da Lima HyFlex, (a) Antes do uso (b) Após uso [33]

Com tratamento térmico, **Figura 2.20**, a forma original da lima pode ser recuperada e é possível regenerar a sua estrutura cristalina e resistência à fadiga, **Figura 2.21**. Se a lima não recuperar a sua forma original após o tratamento, como está representado na **Figura 2.22**, a lima sofreu deformação plástica havendo maior risco de fratura e por isso esta lima deve ser descartada [33].



Figura 2.20 - Tratamento térmico, **(a)** Lima HyFlex deformada, **(b)** Água aquecida a 55 °C, **(c)** Lima mergulhada na água aquecida [32].



(a)

(b)

Figura 2.21 – **(a)** Lima HyFlex após tratamento com a sua forma original, **(b)** Respetiva representação, adaptado de [32, 33]



(a)

(b)

Figura 2.22 - **(a)** Lima HyFlex após tratamento com a sua forma original, **(b)** Respetiva representação, adaptado de [32, 33] respetivamente.

Na bibliografia [3] foram estudados métodos de END para inspeção de limas de endodontia e deteção de micro defeitos para evitar a fratura durante o tratamento. Foram usadas duas técnicas de END para avaliar os defeitos existentes: termografia e correntes induzidas.

Ambas as técnicas apresentam vantagens e desvantagens. Sendo que por inspeção termográfica o contraste térmico na zona do defeito e a resolução da camara não permite a deteção de defeito de dimensões tão reduzidas dimensões. Um exemplo dos resultados obtidos por termografia na bibliografia [3] na fase de aquecimento, equilíbrio térmico e arrefecimento podem ser verificados respetivamente na **Figura 2.23**.

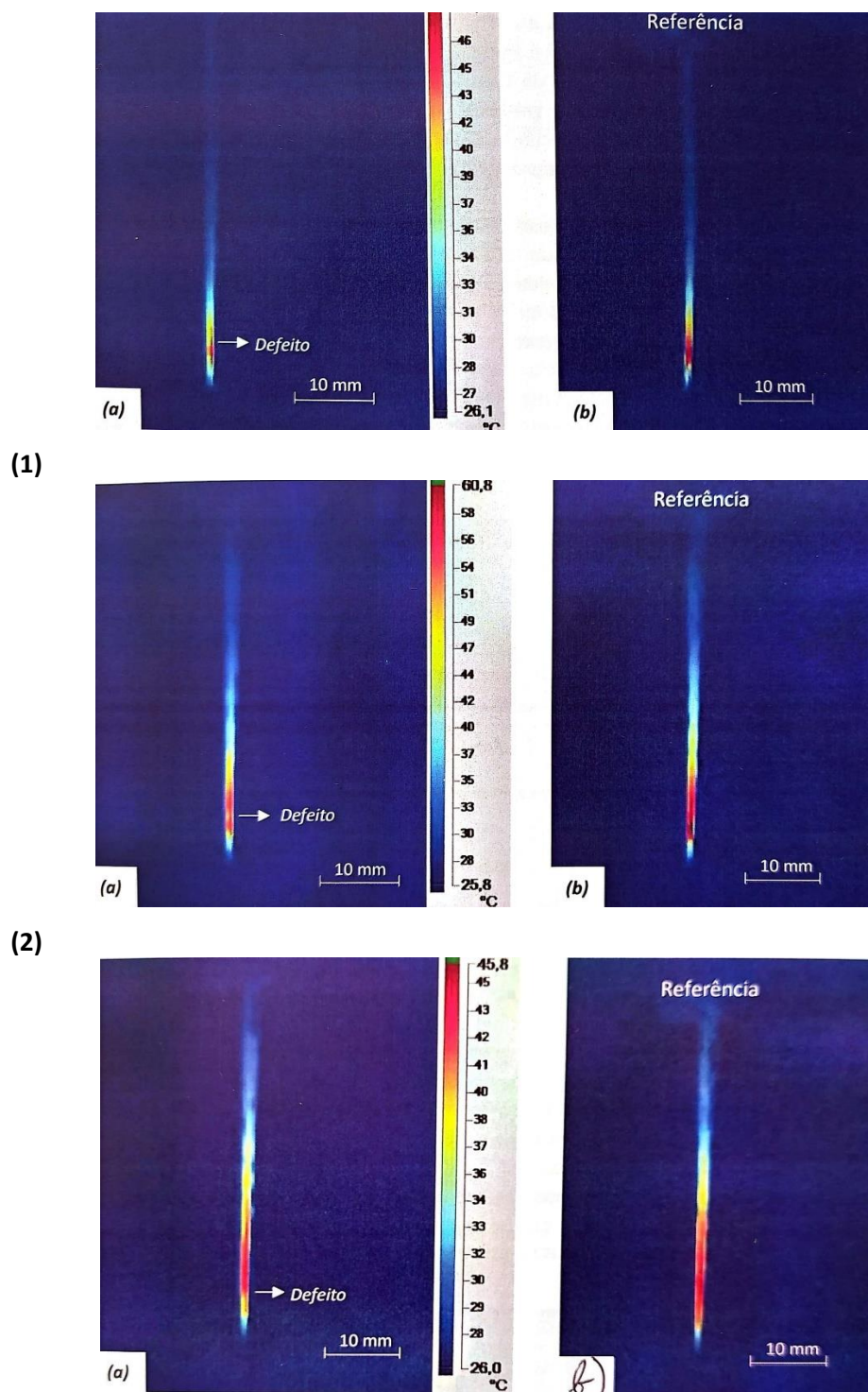


Figura 2.23 - Comparação de resultados entre (a) limas com defeito e (b) limas sem defeito de termografias obtidas na bibliografia [3], **(1)** na fase de aquecimento, **(2)** fase de equilíbrio térmico, **(3)** fase de arrefecimento

Na **Tabela 2.2** são apresentados os maiores desafios à aplicação de CI como END nas limas de endodontia.

Tabela 2.2 - Desafios na aplicação de CI para detecção de defeitos nas limas de endodontia

Características		Desafios
Dimensionais	Diâmetro	<u>Diâmetro</u> do instrumento <u>inferior ao milímetro</u> , o que implica que as <u>bobinas</u> das sondas tenham dimensões <u>igualmente reduzidas</u> .
	Tipos de defeitos	<u>Defeitos</u> de fadiga com <u>dimensões muito reduzidas</u> com direção transversal, mesma direção que é esperada dos instrumentos.
Geométricas	Conicidade	Os instrumentos apresentam um <u>diâmetro variável</u> .
	Superfície não uniforme	As <u>espiras</u> ao longo do volume originam uma <u>variação do volume</u> de material.
Físicas	Baixa condutividade elétrica	A condutividade do material do instrumento, Ni-Ti, é cerca de 2,20% IACS o que obriga o uso de frequências altas para contrariar o efeito de pele.
	Material não ferromagnético	O material apresenta uma permeabilidade magnética próxima da do ar tornando a <u>diferença entre o material e o defeito</u> muito reduzida.

Na abordagem realizada na bibliografia [3] para a inspeção por CI, a sonda envolvia a lima e os eixos das duas eram coincidentes, como está representado na **Figura 2.24**, a sonda percorria todo o comprimento da sonda. Devido ao seu perfil variável o efeito lift-off não era constante criando ruído e ofuscando possíveis defeitos. A abordagem seguinte seria tentar diminuir a variação do efeito *lift-off* fazendo com que a sonda percorresse a lima de forma a que esta estivesse sempre encostada a uma das faces, como está representado na **Figura 2.25**.



Figura 2.24 - Montagem experimental para inspeção por CI usada na bibliografia [3].



Figura 2.25 – Representação esquemática para possível nova abordagem para montagem experimental, (imagem não está à escala).

2.5.2 - Caracterização dos Instrumentos de Estudo

Atualmente existe uma grande variedade de limas de endodontia com diferentes configurações estando agrupados com as normas ISO e ANSI. Estas normas impõem que o comprimento ativo, o comprimento da superfície de corte, seja de 16 mm [34].

Os instrumentos são classificados pela sua conicidade, dada em percentagem, e diâmetro de ponta, D_1 , em centésimas de milímetro. Com estas duas características o diâmetro na parte final da superfície de corte, D_{16} , é definido. Estas características podem ser verificadas na **Figura 2.26**.

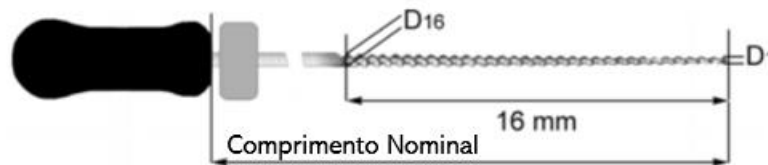


Figura 2.26 - Representação de um instrumento endodôntico normalizado segundo a norma ISO, adaptado de [34].

Por exemplo, uma lima do tipo 80/.02 tem uma conicidade de 2% e diâmetro de ponta de 0,8 mm. O diâmetro da lima irá aumentar 0,02 mm por cada milímetro do eixo e por isso D_{16} , é 0,32 mm maior que o D_1 .

2.6 Mapeamento de Condutividade

Para verificar a vida útil dos componentes é essencial verificar que não há degradação indesejada na microestrutura. Com a técnica de CI é possível verificar alterações na condutividade elétrica e permeabilidade magnética no material [5].

Uma das abordagens para simular numericamente falhas pode ser verificado na **Figura 2.27**, onde células com condutividade menor do que a do material base marcam a área com defeito e células com condutividade igual à do material base constituem a região sem falhas. A condutividade do material base é simbolizada por σ_0 . Com as variações dos valores de impedância dados pela sonda é possível obter o perfil da fissura [35]. Com o mesmo método é possível estudar as possíveis alterações nas características de um material depois de ser submetido a um processo.

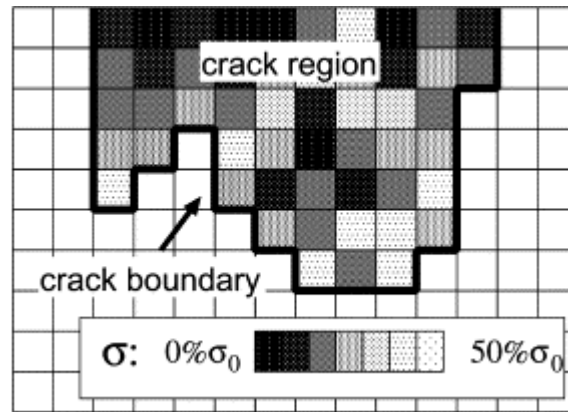


Figura 2.27 - Modelo usado para simular numericamente falhas [35]

2.7 - Síntese do capítulo

Neste Capítulo de revisão bibliográfica foram explorados os métodos de END em especial o de CI e as suas limitações. Também foram estudados os tipos de Sondas de CI e os modos de funcionamento e ligação.

Foram estudados os métodos de END mais adequados à inspeção de cordões brasados a laser e de limas de endodontia e quais os defeitos mais comuns em cada um dos casos. Também foi estudada a possibilidade de usar CI para mapeamento de condutividades.

3 - METODOLOGIA

3.1 - Introdução

Como continuação aos estudos retratados no capítulo anterior foram desenvolvidas novas configurações de sonda que possam ser mais eficientes na localização de micro defeitos. As sondas necessárias aos ensaios deste trabalho não são comercializadas devido às suas micro dimensões e por isso foi necessária a customização de várias bobinas com diferentes características para produção de sondas.

Neste capítulo procede-se a uma descrição pormenorizada da metodologia adotada e dos procedimentos laboratoriais utilizados com o intuito de atingir os objetivos definidos.

3.2 - Simulações Numéricas

Para determinar as características mais indicadas das bobinas vários parâmetros foram simulados numericamente no software Ansys Electronics para estudar o seu impacto nos fenómenos magnéticos e eletromagnéticos envolvidos. O software utiliza as equações de Maxwell e o Método de Elementos Finitos (MEF) para calcular os fenómenos envolvidos na utilização da sonda.

O diâmetro e material do núcleo e *shield*, número, material e altura dos enrolamentos, *lift-off* e frequência de excitação foram fixos para estudar a influência das diferentes relações entre a altura dos enrolamentos e a altura do núcleo e *shield* na concentração e intensidade das CI e do campo magnético.

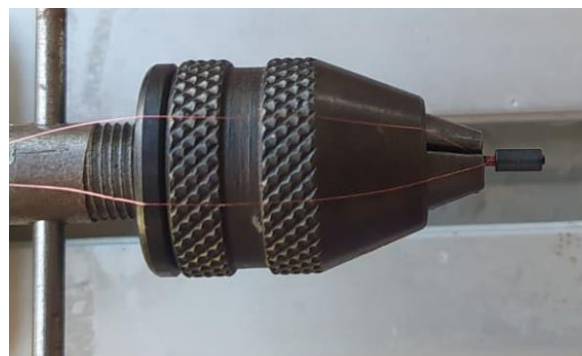
A altura do shield e do núcleo foram variadas para estudar o seu impacto nos ensaios de correntes induzidas. Foram simuladas três alturas para cada elemento anteriormente descrito: 2,5 mm, 3,8 mm e 7,5 mm e fixo o valor da frequência em 750 kHz, a altura dos enrolamentos em 3,8 mm e o número de enrolamentos em 100 para todas as simulações.

3.3 - Conceção de bobinas

O diâmetro do núcleo e do fio das bobinas têm dimensões na ordem dos micrómetros o que dificulta o seu manuseamento assim, optou-se por usar o enrolador de bobinas desenvolvido na bibliografia [2] onde os enrolamentos foram feitos em torno do núcleo, como pode ser verificado na **Figura 3.1 – (a)**, e posteriormente fixos com Loctite 435, garantindo assim que a bobina mantinha a sua forma original, podendo ser adicionado também um *shield*, **Figura 3.1 – (b)**.



(a)



(b)

Figura 3.1 - Bobina construída com auxílio do enrolador de bobinas, (a) sem shield, (b) com shield.

As características das diferentes bobinas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente que foram criadas podem ser verificadas na **Tabela 3.1** onde a denominação feita nesta tabela corresponde à identificação impressa na caixa de cada sonda.

Tabela 3.1 - Características bobinas desenvolvidas e suas denominações.

		Denominação												
		E	F	G	C	A	B	D	H	I	J	K	L	M
Núcleo	Diâmetro	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Altura (mm)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Shield	Diâmetro interno (mm)	1,4	Na	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	Na	Na
	Diâmetro externo (mm)	1,9	Na	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	Na	Na
	Altura (mm)	3,8	Na	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	Na	Na
Enrolamentos	Diâmetro fio (μ m)	45	45	35	35	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	Nº enrolamentos	115	200	170	200	100	125	100	20	30	20	60	400	20
	Altura enrolamento	3,8	3,8	3,8	3,8	4,6	4,6	3,8	3,8	3,8	2,5	3,8	3,8	3,8

Na – Não aplicável

Estas bobinas são instaladas dentro de invólucros, **Figura 3,2**, para prosseguir à instalação entre os diferentes elementos,

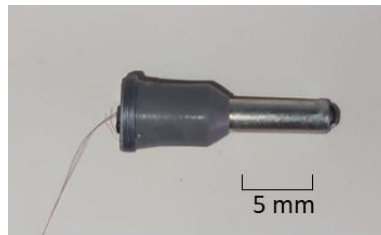


Figura 3,2 - Exemplo de invólucro com bobina já instalada,

Também foram desenvolvidas bobinas com direções de enrolamento coincidentes à do eixo das limas, Estas sondas foram projetadas para funcionar como instrumento móvel no prato da Mesa XY e a lima como elemento fixo montado no braço da Mesa XY, mantendo o eixo das duas coincidente,

Foram concebidos dois tipos de sondas: com forma semicircular que concentra o campo de CI de forma uniforme ao longo do perímetro coberto pela sonda, designada por Sonda W representada na **Figura 3,3 – (a)** e com forma toroidal que facilita a concentração de correntes

induzidas numa pequena área da lima e em todo o seu perímetro, designada por Sonda Z e representada na **Figura 3,3 – (b)**,

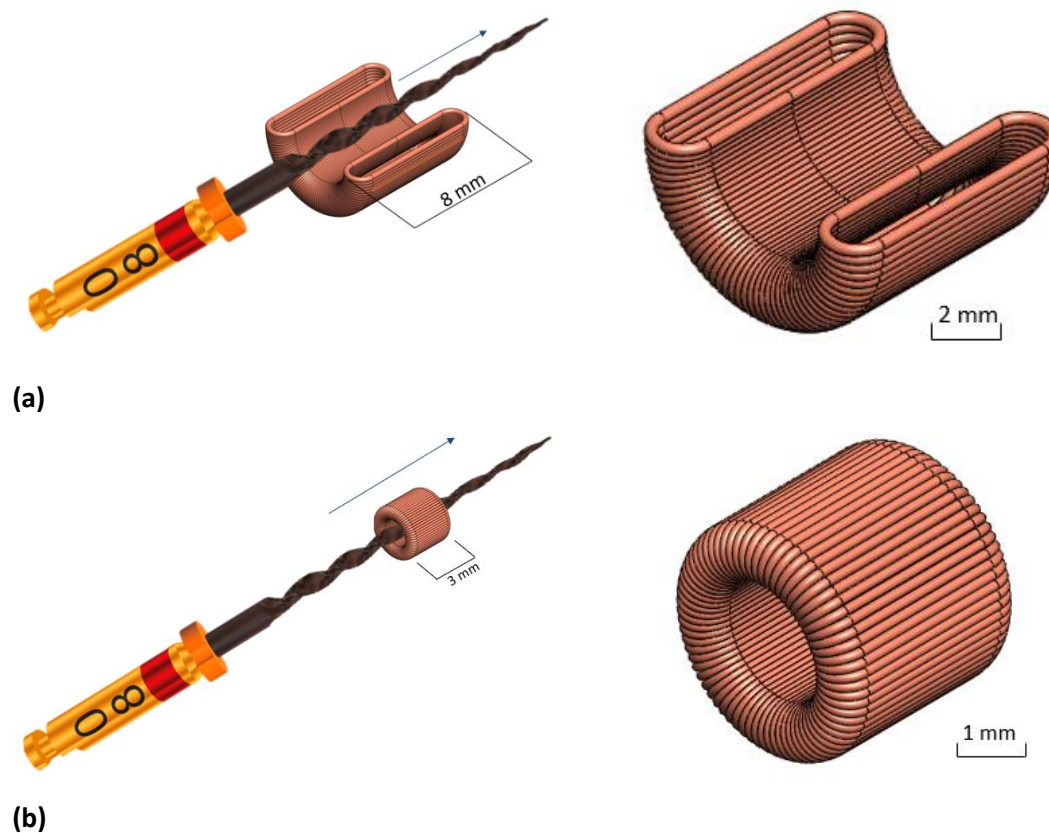


Figura 3,3 - Representação da montagem para inspeção da lima com a sonda, **(a)** Semicircular, **(b)** Toroidal,

As características das sondas com forma semicircular e toroidal podem ser verificadas na **Tabela 3,2** e a representação da cotagem para cada tipo de sonda está representado na **Figura 3,4**,

Tabela 3,2 - Características da sonda com geometria toroidal, Sonda Z, e sonda com geometria semicircular, Sonda W,

	Denominação	
	Z	W
Diâmetro exterior da secção transversal dos enrolamentos (mm)	3	6,5
Diâmetro interior da secção transversal dos enrolamentos (mm)	2	4
Nº enrolamentos	100	100
Altura dos enrolamentos (mm)	3	8

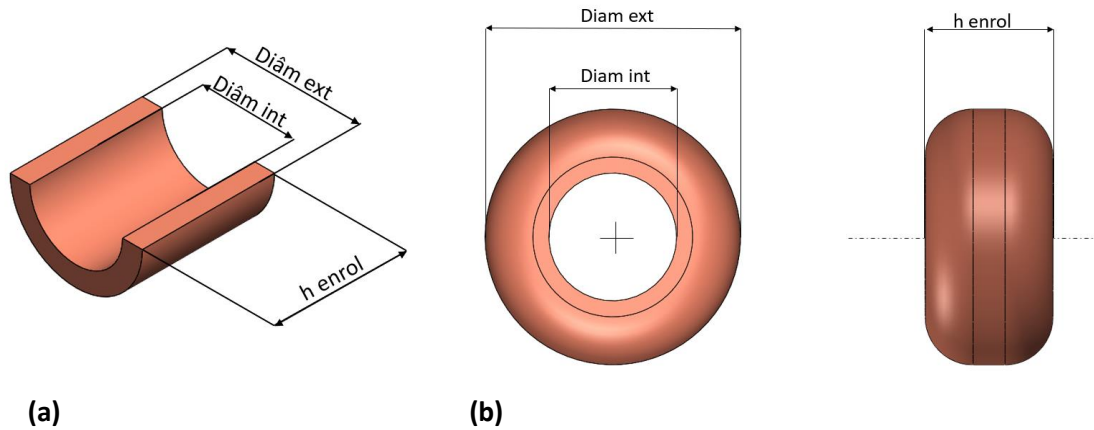


Figura 3,4 - Representação da cotagem para a: **(a)** Sonda W, **(b)** Sonda Z,

Por último foram desenvolvidas sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente, comercializadas, com menores diâmetros e com as características da **Tabela 3,3**,

Tabela 3,3 - Características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente,

		Denominação	
		LT-400	LT-200
Enrolamentos	Diâmetro do fio (μm)	16	16
	Nº enrolamento	400	200
	Altura enrolamento	2,5	1,5

A estas bobinas foram adicionados o núcleo e o *shield* e de seguida montadas num invólucro, à semelhança das anteriores, As diferentes fases deste processo podem ser verificadas na **Figura 3,5**,

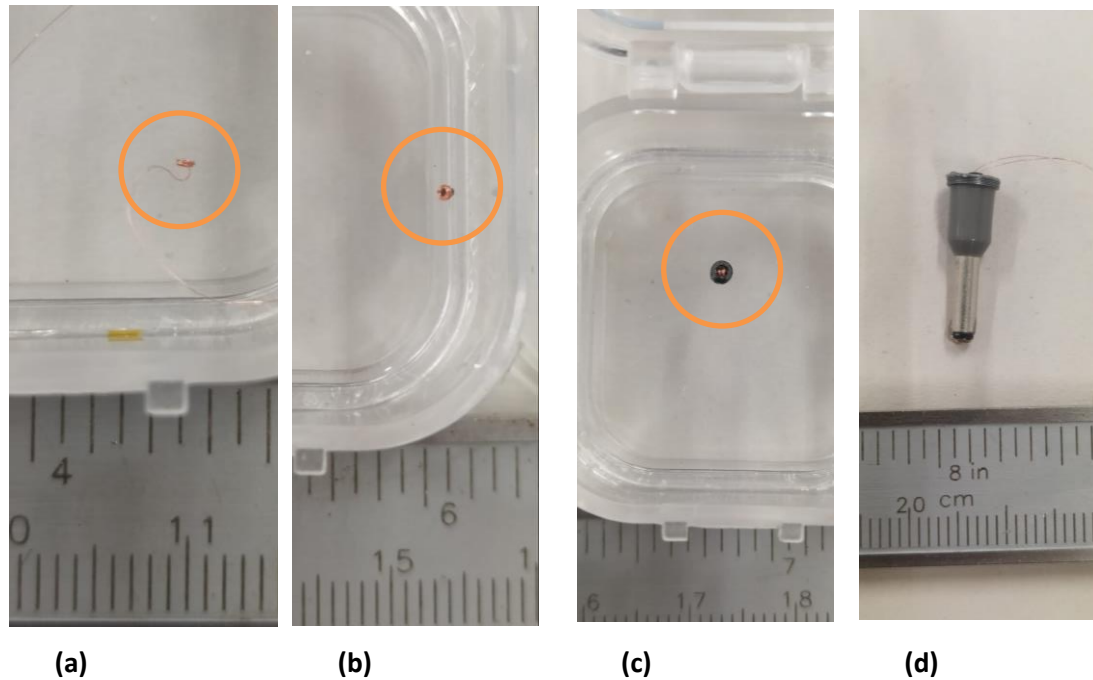


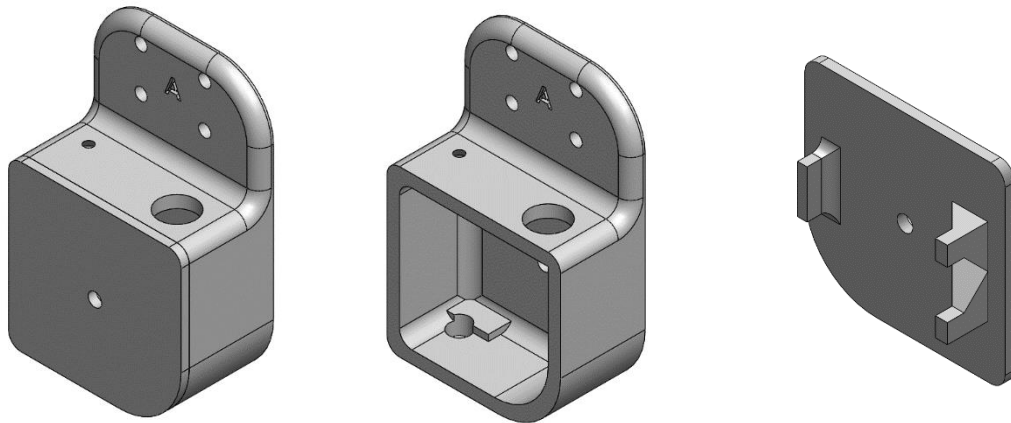
Figura 3,5 - Exemplo de micro bobina, **(a)** bobina helicoidal cilíndrica enrolada industrialmente, **(b)** com núcleo, **(c)** com núcleo e *shield* e **(d)** bobina montada com núcleo e *shield* montada no invólucro,

3.4 - Conceção do Chassis da Sonda e Montagem

Foram desenvolvidos quatro tipo de sondas diferentes: sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente, sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente, sondas com geometria semicircular e sondas com geometria toroidal,

O chassi que vai alojar as bobinas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com designação de A a M foi projetado de modo a respeitar as seguintes características: alojar dois invólucros de bobinas em sentidos opostos, de forma a uma estar sobre ao material de teste e a outra ao ar ou sobre um material padrão, e alojar o conector de modo a que este esteja no topo, para facilitar a ligação com o cabo ao instrumento de medição,

O chassi da sonda, **Figura 3,6 – (a)**, foi dividido em duas partes: a caixa, **Figura 3,6 – (b)**, que envolve os dois invólucros e o conector; e a tampa, **Figura 3,6 – (c)**, que irá ter os batentes para manter os invólucros estáveis e impedir a rotação da tampa, A caixa e a tampa são fixas por um parafuso no meio da sonda,



(a)

(b)

(c)

Figura 3,6 – Chassi da sonda usada com as bobinas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente **(a)** montagem completa da sonda, **(b)** caixa da sonda, **(c)** tampa da sonda,

Para minimizar interferências dentro da sonda é utilizado um parafuso de nylon e após as bobinas serem soldadas aos conectores, os fios são fixos dentro da sonda, a montagem final pode ser verificada na **Figura 3,7**,

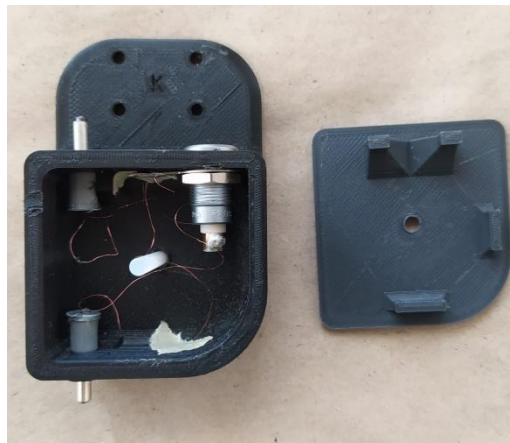


Figura 3,7 - Montagem dos diferentes elementos das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente,

O chassi que vai alojar a bobina com forma semicircular foi projetada para garantir o fácil acesso ao elemento de estudo e para ser fixa à base da Mesa XY sendo assim o elemento móvel durante a inspeção, A sonda com geometria semicírculo e a montagem entre os diferentes elementos pode ser verificado na **Figura 3,8**,

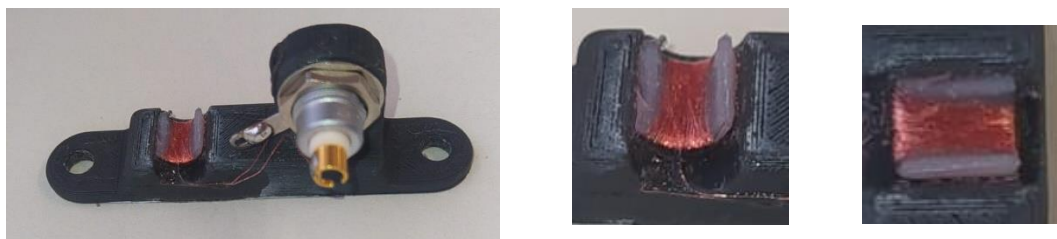


Figura 3,8 - Sonda com geometria semicircular,

A sonda com geometria toroidal, sonda Z, **Figura 3,9 – (a)**, foi montada com uma bobina com 100 enrolamentos, **Figura 3,9 – (b)**, e com duas bobinas de 100 enrolamentos, **Figura 3,9 – (c)**, os enrolamentos das duas bobinas estão distribuídos ao longo de todo o perímetro e à semelhança da sonda anterior vai ser o elemento móvel, montada no prato da Mesa XY, e aloja o conector e as bobinas,

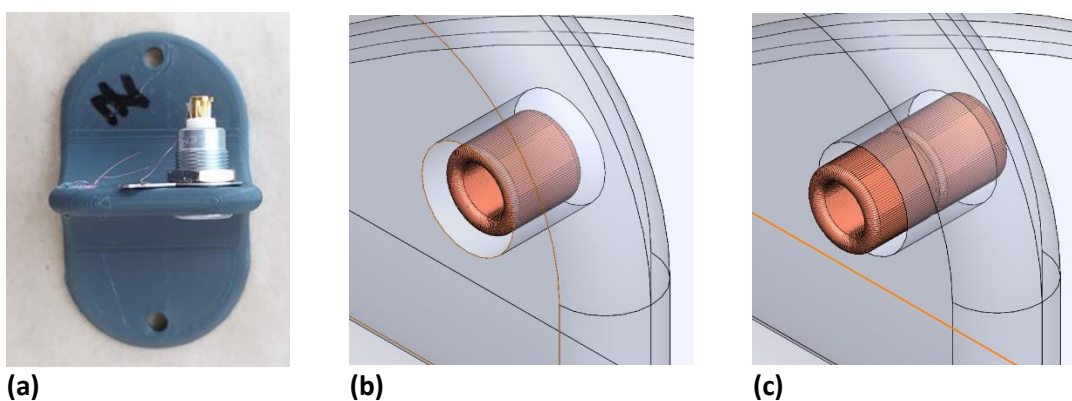


Figura 3,9 –(a) Montagem sonda Z, **(b)** modo absoluto, **(c)** modo diferencial,

As bobinas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente com 200 e 400 enrolamentos foram montadas na sonda anteriormente desenvolvida no documento [1] e depois fixas a um suporte para serem instaladas no braço da Mesa XY, A sonda com todos os elementos montados pode ser verificada na **Figura 3,10**,

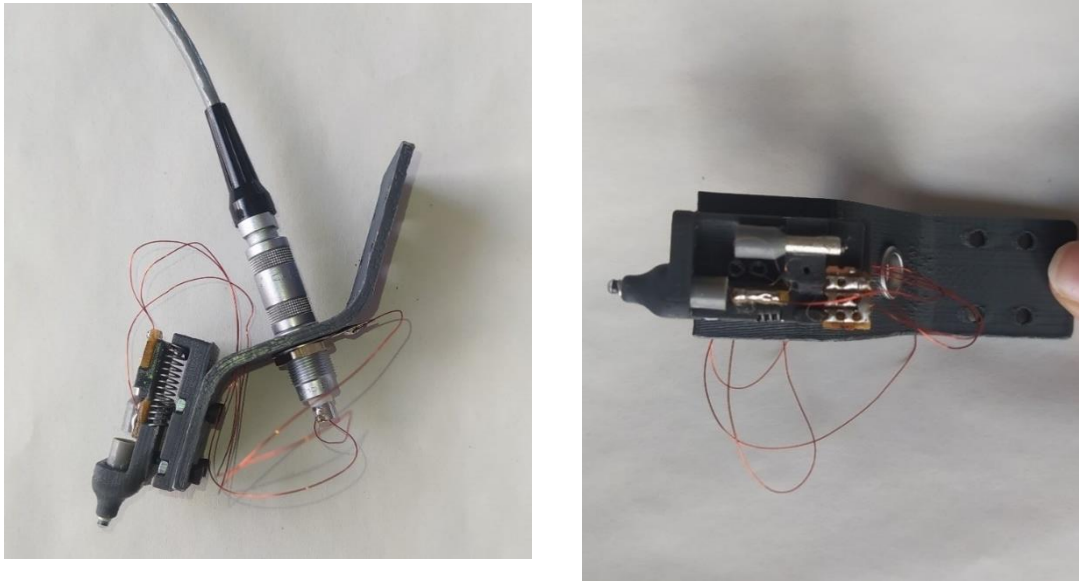
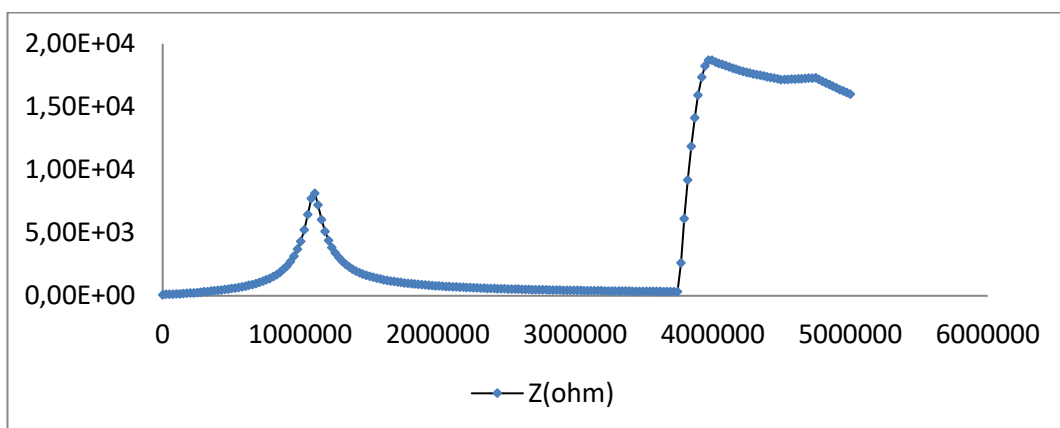


Figura 3,10 - Sonda helicoidal cilíndrica enrolada industrialmente,

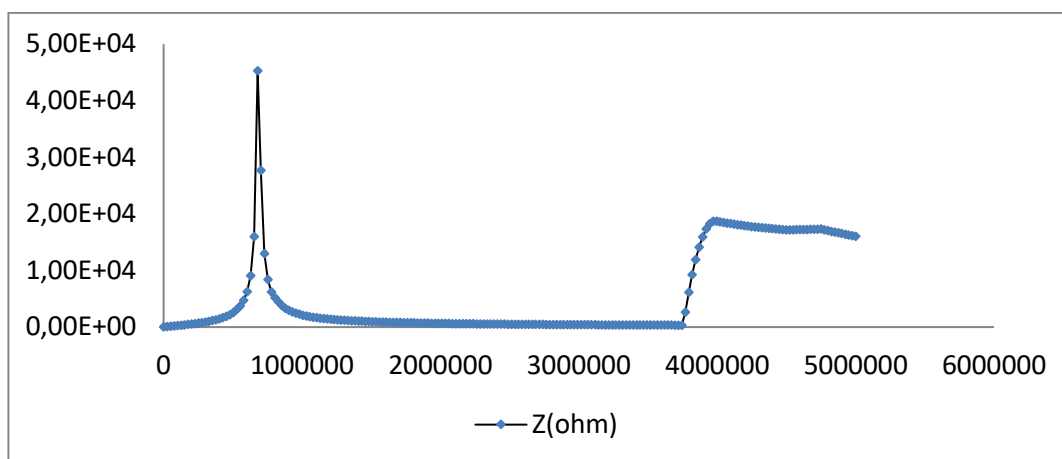
3.5 - Caracterização de Sondas de CI

Foram realizados varrimentos em frequências com o auxílio do dispositivo HIOKI 3532-50 LCR para caracterizar as bobinas, Nomeadamente para verificar se cada par de bobinas era idêntico e determinar a sua frequência de ressonância e consequentemente a frequência ótima de funcionamento,

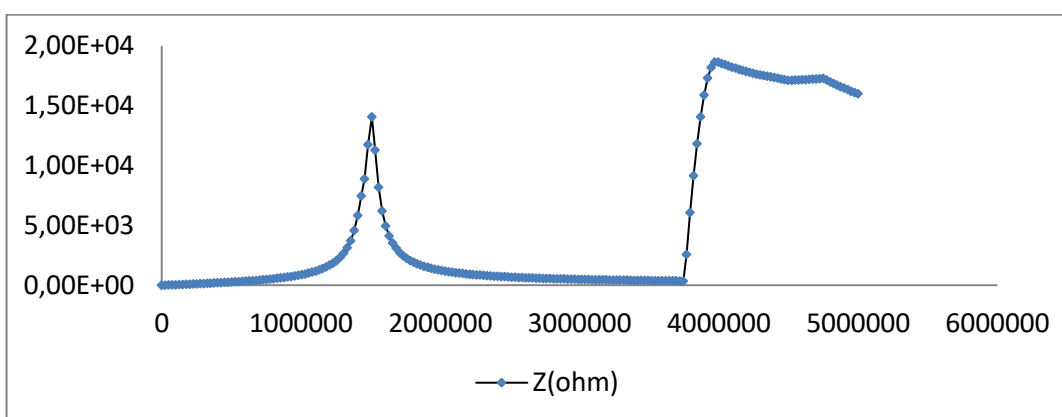
Com auxílio do software da marca, HIOKI LCR, o dispositivo registou a resposta da bobina entre a frequência 50 Hz e 5 MHz com 200 passos intermédios e exportou os dados para uma folha de Excel onde para cada frequência foi documentado a impedância elétrica do sistema em ohm (Ω), a indutância (h) e o ângulo de fase em graus, Na **Figura 3,11** estão os resultados da impedância obtidos para as frequências testadas para uma das bobinas da sonda L, com 400 enrolamentos, da sonda C, com 200 enrolamentos e da sonda A, com 100 enrolamentos,



(a)



(b)



(c)

Figura 3,11 - Resultados do varrimento de frequências, **(a)** Sonda L – 400 enrolamentos, **(b)** Sonda C – 200 enrolamentos, **(c)** Sonda A – 100 enrolamentos,

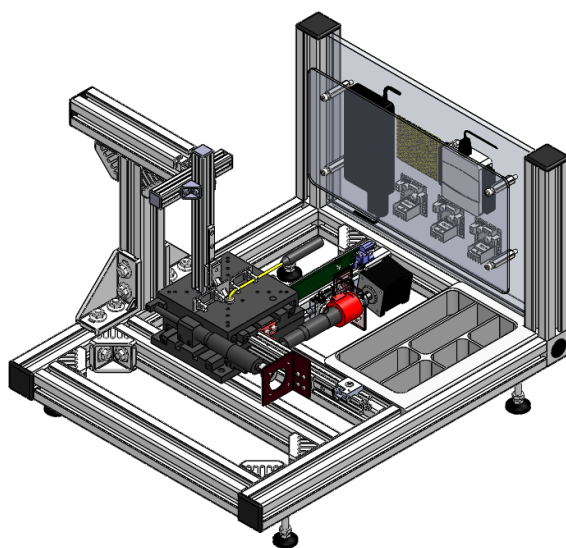
Do varrimento de frequências foi estabelecida a frequência de ressonância de cada bobina e aproximada a frequência ótima em relação à anterior, Os resultados podem ser verificados na **Tabela 3,4**,

Tabela 3,4 - Frequência ótima em MHz para as sondas desenvolvidas,

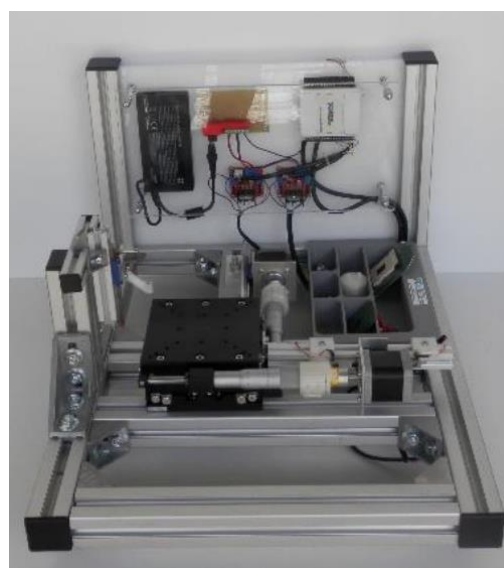
Sondas	Frequência ótima (MHz)
A	1,2
B	0,4
C	1,1
D	0,9
E	1,9
F	0,4
G	3,5
H	3,5
I	3,5
J	3,5
K	2,1
L	0,9
M	3,5
W	2
Z	2
LT-200	2,1
LT-400	0,5

3.6 - Melhorias no Dispositivo de Posição - Mesa XY

As sondas vão ser instaladas num dispositivo que permite o seu movimento de forma automatizada, Mesa XY, desenvolvida na bibliografia [2], O aparelho permite a obtenção de dados e funciona como dispositivo de posicionamento e movimento de sondas no plano XY com resolução na ordem dos 0,5 μm , no entanto tinha algumas limitações e foram feitas alterações mecânicas e eletrônicas,



(a)



(b)

Figura 3,12 –Mesa XY desenvolvida anteriormente na bibliografia [2], **(a)** CAD;
(b) Montagem [2],

Uma limitação da Mesa XY consistia na sua velocidade de inspeção que foi melhorada com o recurso a eletrónica de impressoras 3D de polímeros, que permite um sistema económico e prático também possível de controlar com um ecrã tátil, A comparação entre a montagem eletrónica anterior e a melhorada pode ser verificada na **Figura 3,13**,

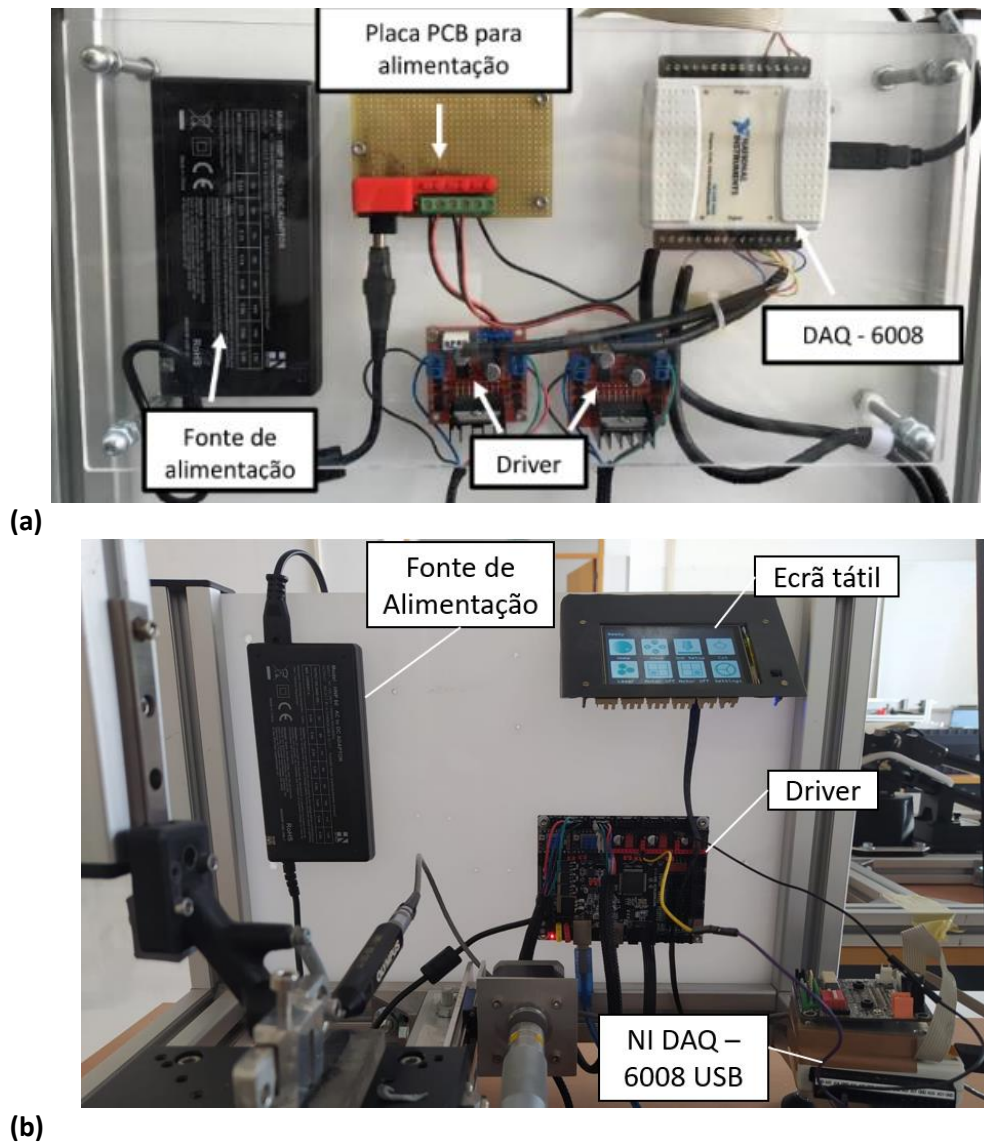


Figura 3,13 – Montagem eletrónica da: **(a)** Mesa XY anteriormente desenvolvida,
(b) Mesa XY melhorada,

A Mesa XY é constituída por uma fonte de tensão ALF2902M que funciona a 12 V e alimenta o ecrã tátil e o driver dos motores passo a passo, Os dados são adquiridos pelo equipamento

Olympus Nortec 500C que fornece a parte real e imaginária da impedância elétrica à placa NI DAQ – 6008, Os dados são depois processados pelo *software* LabView,

O *software* LabView 2015 da National Instruments recebe e analisa os dados obtidos pela placa NI DAQ – 6008 e gera o código G que dá as instruções de movimento à placa do controlador,

O movimento da mesa XGPG120 da MISUMI no plano XY é efetuado com recurso de motores passo a passo, MY17HD6N-4 da ASTROSYN, que são acoplados nas extremidades livres dos braços de micrómetros, responsáveis pelo movimento linear da mesa, **Figura 3,14**,

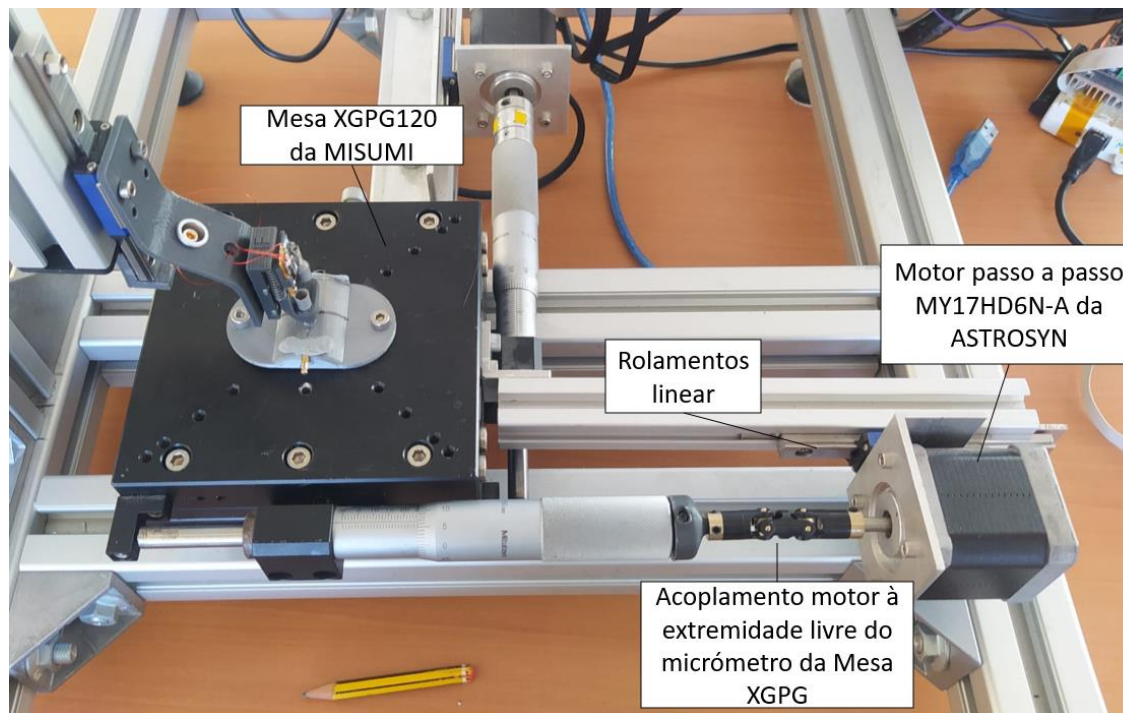


Figura 3,14 – Scanner automatizado no plano XY e diferentes elementos,

As peças desenvolvidas para realizar o acoplamento entre os micrómetros necessitaram de ser alteradas por não permitirem o funcionamento à tração do conjunto, No projeto do novo sistema foi verificado que o micrómetro e o motor dificilmente se mantinham alinhados e por isso foi usado uma braçadeira de 3 partes que garante que nenhuma peça é forçada enquanto os eixos se encontram em rotação, Como a braçadeira e o braço do micrómetro têm diferentes diâmetros foi projetada e impressa a 3D em polímero uma peça de ligação onde uma extremidade envolve o braço do micrómetro e assegura a ligação pelos furos A, legendados na **Figura 3,15**, e a outra é envolvida pela braçadeira e presa pelo sistema já existente

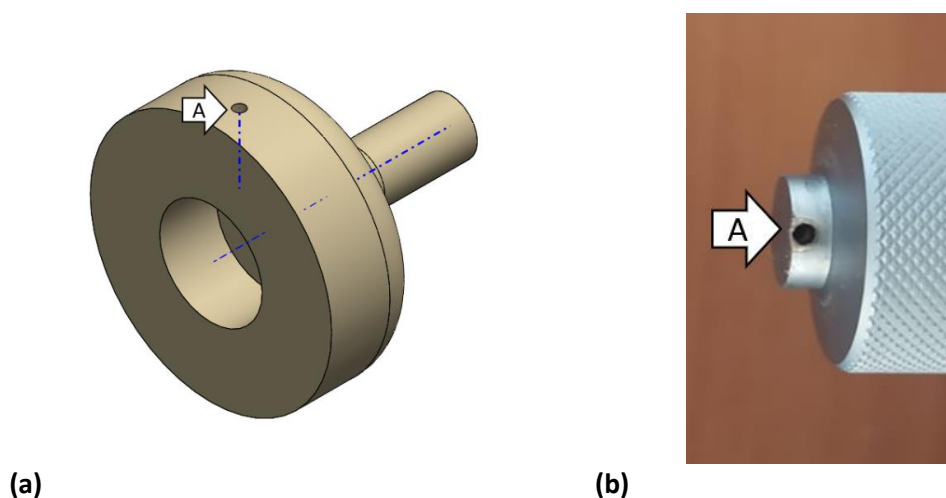


Figura 3,15 – Furo A que assegura a ligação entre, **(a)** peça de ligação, **(b)** braço do micrómetro,

Na **Figura 3,16** estão comparados os dois sistemas de ligação, o anteriormente desenvolvido e o atualizado que foi utilizado nos ensaios durante o desenvolvimento do trabalho,

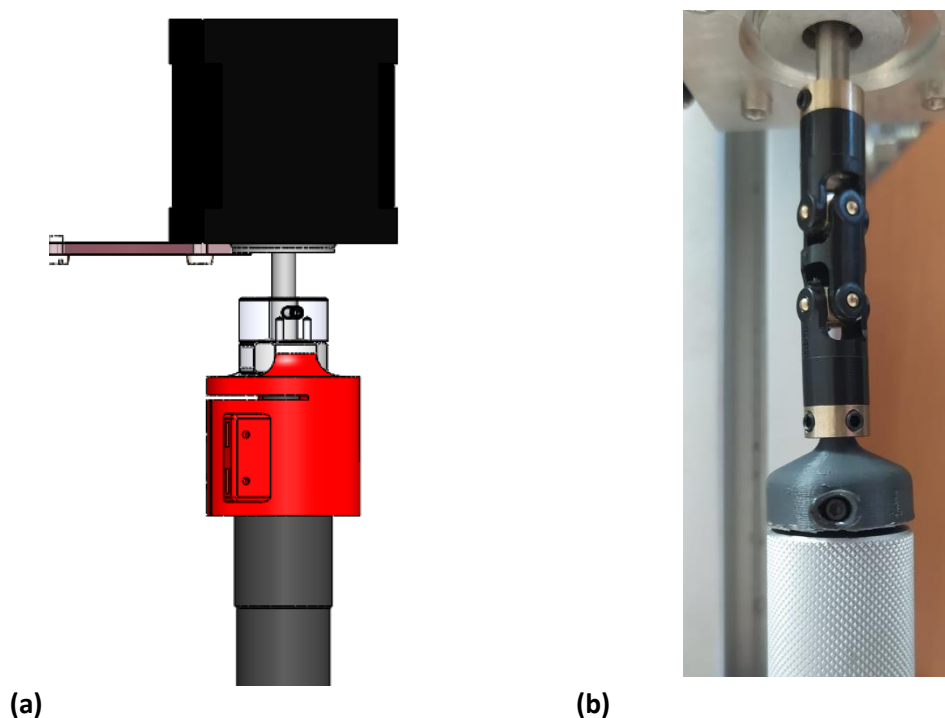
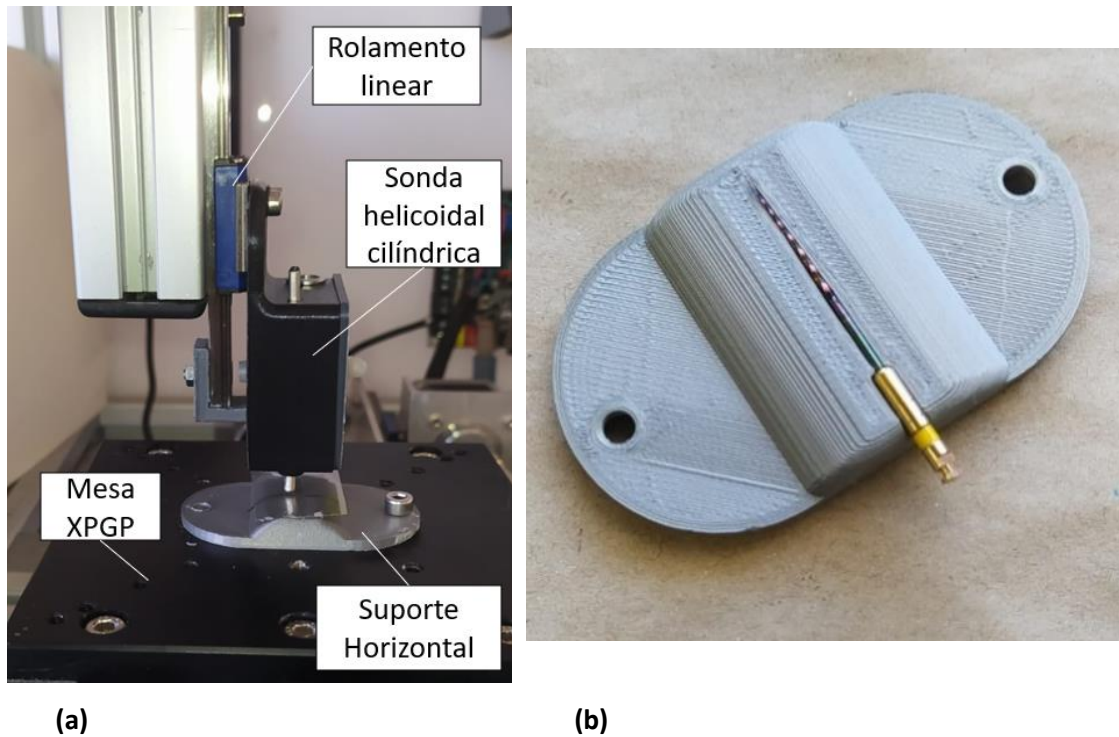


Figura 3,16 - Peças de ligação entre micrómetro e motor, **(a)** peça anteriormente desenvolvida, **(b)** conjunto de peças atualizadas,

3.7 - Desenvolvimento de Condições de Inspeção

Para a realização dos Ensaios de CI às limas de endodontia, devido ao seu diâmetro reduzido inferior a 1 mm, foi necessário desenvolver dois tipos de suporte para imobilizar os instrumentos,

Na montagem realizada para a inspeção com as sondas helicoidais cilíndricas, **Figura 3,7 – (a)**, a lima é imobilizada no Suporte Horizontal, **Figura 3,7 – (b)**, e fixo à Mesa XPGP, para manter a superfície a inspecionar perpendicular à sonda, que está montada no rolamento linear que ajusta a sua altura e minimiza as variações de *lift-off*,

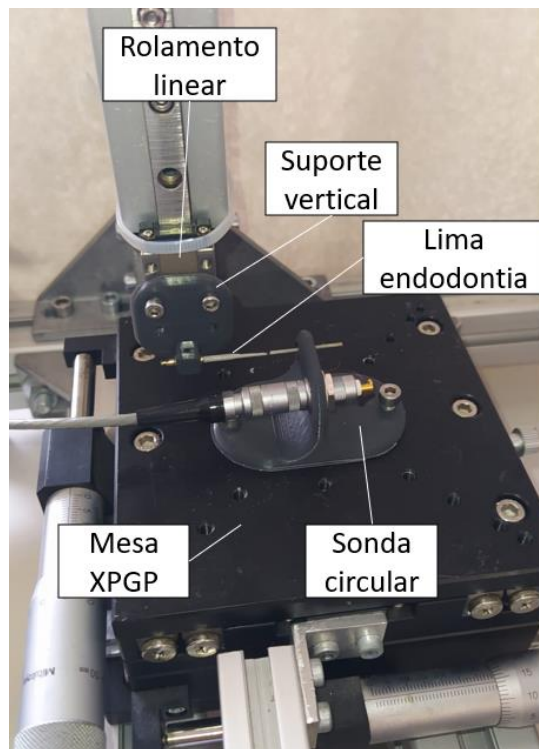


(a)

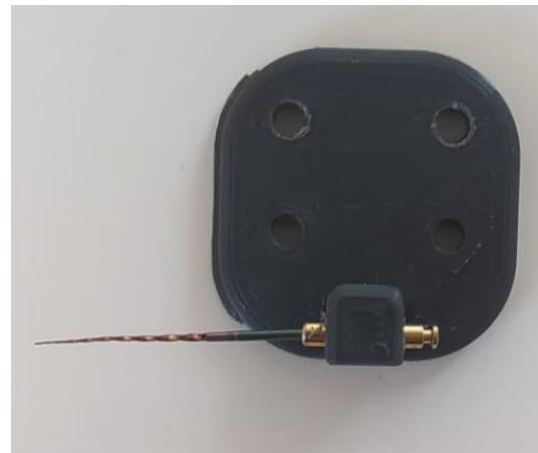
(b)

Figura 3,17 – (a) Montagem utilizada na inspeção com as Sondas helicoidais cilíndricas, **(b)** Suporte Horizontal,

Na **Figura 3,18 – (a)** está representada a montagem utilizada para a inspeção com as sondas com geometria circular semelhante à utilizada com a sonda toroidal, O Suporte Vertical, **Figura 3,18 – (b)**, foi projetado para fixar a lima enquanto mantém o eixo do instrumento coincidente com o do instrumento de endodontia,



(a)



(b)

Figura 3,18 - (a) Montagem utilizada na inspeção com as sondas com geometria circular, (b) Suporte Vertical,

4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS SONDAS DE CORRENTES INDUZIDAS

4.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação numérica das sondas de correntes induzidas, É descrito o modelo da sonda a simular e a malha de elementos finitos usada para estudar o comportamento dos fenómenos elétricos e magnéticos envolvidos no seu funcionamento,

Também são apresentados os resultados obtidos com diferentes configurações e relação entre altura do *shield* e núcleo em relação à da dos enrolamentos,

4.2 - Simulação numérica

Foram realizadas simulações numéricas no programa ANSYS Electronics para estudar certos parâmetros das bobinas a integrar na sonda com o objetivo de determinar o impacto de cada parâmetro e as características mais indicadas para os casos de estudo,

As simulações numéricas realizadas através do MEF tiveram como objetivo estudar o impacto da relação entre as alturas do *shield* e núcleo comparativamente à dos enrolamentos para bobinas helicoidais cilíndricas de reduzido diâmetro. Para este estudo comparativo foi criado um modelo tridimensional da sonda constituída pelos seguintes elementos: *shield*, núcleo e enrolamentos, conforme ilustrado na **Figura 4,1**,

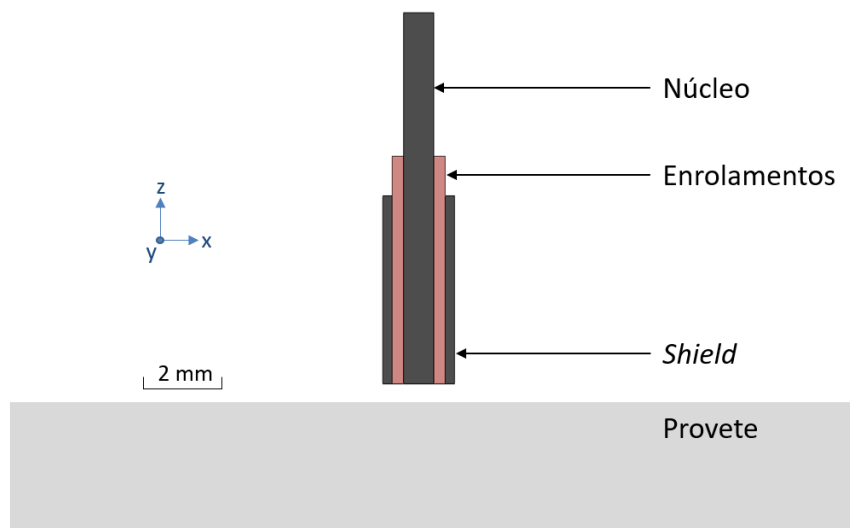


Figura 4,1 – CAD do modelo utilizado nas simulações e componentes,

A malha de elementos finitos do modelo é constituída por elementos em forma de tetraedro. Foi definido o número máximo de elementos na malha, 400 000, para o plano XZ que atravessa a bobina e o provete na origem do modelo sendo esta gerada automaticamente, pelo que o tamanho é adaptado automaticamente à geometria do modelo. Na **Figura 4,2** é apresentada a malha definida pelo programa,

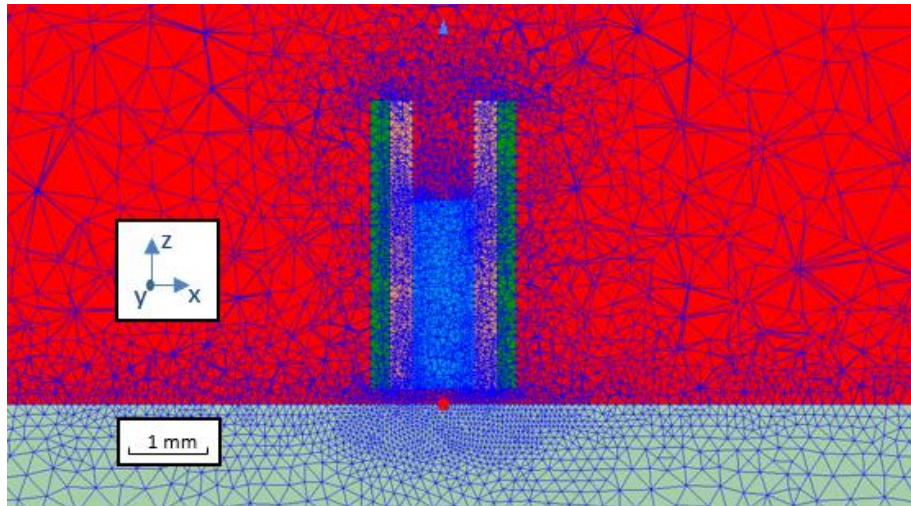


Figura 4,2 – Malha utilizada nas simulações numéricas: peça, sonda e proximidades,

A direção do campo magnético, B , [Tesla], é representada por setas e está concentrado na sonda enquanto que intensidade do campo de correntes induzidas, J , [A/m^2], pode ser verificado no material diretamente abaixo da sonda e, tal como a intensidade do campo magnético, respeita o esquema de cores das escalas apresentadas para cada exemplo,

As sondas foram simuladas numericamente de acordo com os parâmetros apresentados na **Tabela 4,1**,

Tabela 4,1 – Sumário dos parâmetros utilizados nas simulações,

Parâmetros Fixos	Diâmetro núcleo (mm)	0,8
	Diâmetro interno <i>shield</i> (mm)	1,4
	Diâmetro externo <i>shield</i> (mm)	1,8
	Material do núcleo e shield	Ferrite
	Número enrolamentos	100
	Altura dos enrolamentos (mm)	3,8
	Material dos enrolamentos	Cobre
Parâmetros variáveis	Frequência de excitação (kHz)	750
	Altura núcleo (mm)	2,5; 3,8; 7,5
	Altura <i>shield</i> (mm)	2,5; 3,8; 7,5

Para estudar a influência da altura do *shield* nos ensaios de CI a altura do núcleo foi fixa em 7,5 mm, para corresponder à dimensão usada na concepção das bobinas, Os resultados da variação da altura do shield podem ser verificados no **Anexo 1**, Onde é possível verificar que a concentração de campo magnético no centro da sonda é maior com maiores alturas do *shield* sendo assim possível obter uma maior densidade de CI na peça, Enquanto que com uma menor altura de *shield* se verifica campo magnético nas proximidades da sonda, na simulação com uma altura de *shield* maior o campo está principalmente concentrado no centro da sonda,

As simulações realizadas para analisar a influência da altura do núcleo podem ser verificadas no **Anexo 2** onde a altura dos enrolamentos e do *shield* foi fixa em 3,8 mm, A sonda com uma maior altura de núcleo possui um maior campo magnético no centro da bobina que aumenta a intensidade das correntes induzidas na peça, enquanto que com uma altura menor de núcleo o campo magnético está mais concentrado dentro da bobina, mas com menores valores, e assim o valor de correntes induzidas na peça é menor,

No **Anexo 3** os valores da altura do *shield* e núcleo são igualmente alterados para as 3 simulações, Nas simulações onde a variação de altura é igual para o núcleo e para o *shield* o campo magnético é maior e mais concentrado nas bobinas com elementos com alturas maiores, também o valor das correntes induzidas na peça é maior para bobinas com estas características,

As sondas com *shield* menor mostraram um campo de correntes induzidas menos intenso, mas limitado ao diâmetro do enrolamento enquanto que sondas com um shield mais alto mostram um campo de correntes induzidas mais intenso e mais largo,

4.3 - Síntese do Capítulo

Foram realizadas simulações numéricas no *software* Ansys Electronics para estudar o impacto da relação entre as alturas de diferentes elementos da bobina na densidade de correntes induzidas no material a inspecionar e no campo magnético na sonda e proximidades,

Primeiramente foram mantidos todos os parâmetros constantes e a altura do *shield* foi variada para menor, igual e superior à altura dos enrolamentos, Foi verificado que na simulação com altura do *shield* superior à dos enrolamentos a concentração de campo magnético é maior no centro da sonda e as correntes induzidas na peça a inspecionar são mais intensas afetando uma área maior do que bobinas com um *shield* com altura menor que a dos outros elementos,

Fazendo variar a altura do núcleo foi verificado que sondas com núcleos mais altos que os outros elementos da bobina têm campos magnéticos com maior intensidade no centro da sonda e induzem correntes no material mais intensas, e a maior profundidade numa área superior que nas simulações realizadas com núcleo mais curto que os outros elementos,

As conclusões anteriores continuam a ser válidas para as simulações feitas em sondas com altura de *shield* e núcleo iguais, Elementos com maiores alturas em comparação com a dos enrolamentos têm campos magnéticos mais intensos e concentrados no centro da sonda do que sondas com elementos com menores alturas,

Em síntese as bobinas têm campo magnéticos mais intensos e concentrados no núcleo da bobina e correntes induzidas no material mais intensas e que afetam áreas maiores se o núcleo e *shield* tiverem altura maior que a altura dos enrolamentos,

5 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DAS SONDAS DE CORRENTES INDUZIDAS

5.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais na validação experimental das sondas desenvolvidas com diferentes configurações utilizando as condições laboratoriais descritas no capítulo 3,

O capítulo está dividido em 3 partes, Na primeira é feita a caracterização com um defeito padrão e comparadas as sondas com igual número de enrolamentos para tirar conclusões sobre o impacto da relação das alturas dos elementos comparativamente à dos outros elementos no sinal obtido na inspeção de um defeito padrão,

De seguida as sondas são usadas para a inspeção de um defeito superficial e subsuperficial no cordão brasado a laser e são apresentados, comparados e discutidos os resultados dos ensaios de CI,

Por fim são realizados ensaios para a inspeção de limas HyFlex CM 20/,04 com um defeito inserido artificialmente com as sondas helicoidais cilíndricas e sonda com geometria semicircular

e toroidal, desenvolvidas no âmbito da inspeção das limas de endodontia, À semelhança do subcapítulo anterior são apresentados, comparados e discutidos os resultados,

5.2 - Caracterização das Sondas com um Defeito Padrão

Depois de determinada a frequência ótima de utilização de cada sonda foram realizados ensaios num defeito padrão com 20 μm de largura em alumínio para comparação de resultados entre as sondas, A montagem foi igual para todas as sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente: estas foram fixas no rolamento linear no braço da Mesa XY, que através da gravidade garante o *lift-off*, e o material a inspecionar montado de modo a ser movimentado pela Mesa XY, **Figura 5,1**,

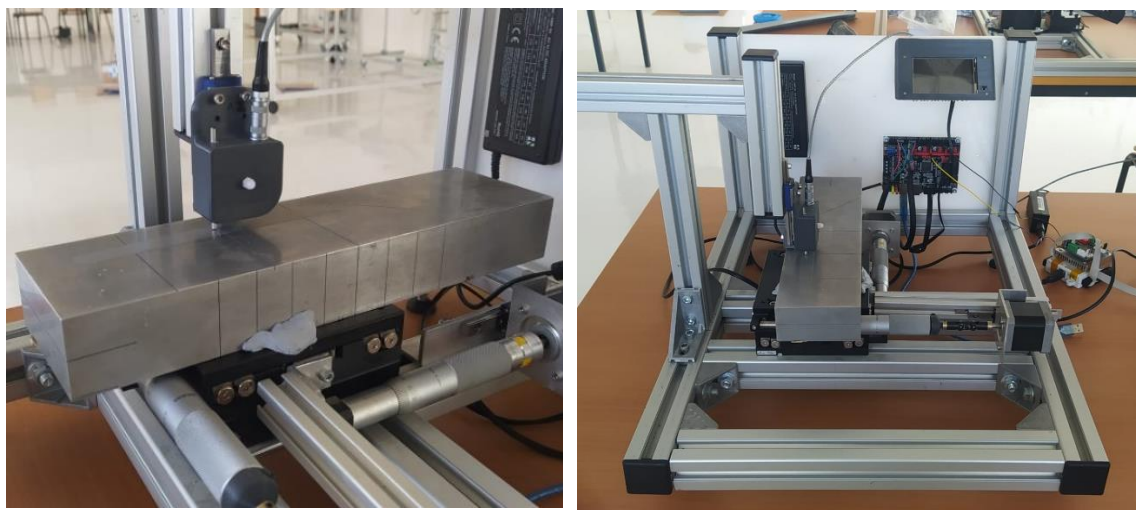
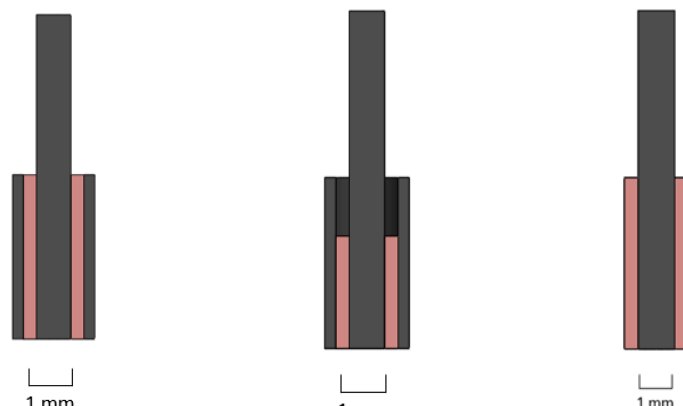


Figura 5,1 - Montagem na Mesa XY para inspecionar material com defeito padrão,

Foram selecionados os resultados das sondas com igual número de enrolamentos, Os resultados obtidos na inspeção com a frequência 3,5 MHz e igual ganho no aparelho de inspeção de um defeito padrão com as sondas construídas com 20 enrolamentos, sondas H, J e M, foram comparados, Na **Tabela 5,1** podem ser verificadas as diferenças entres os diferentes elementos das bobinas das respetivas sondas,

Tabela 5,1 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com 20 enrolamentos utilizadas na inspeção ao defeito padrão,

Representação			
	H	J	M
Denominação	H	J	M

Os ensaios realizados com as sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com 20 enrolamentos foram comparadas as variações de impedância dos resultados à frequência 3,5 MHz com o mesmo ganho apresentados na **Figura 5,2**. É possível verificar que a sonda com os parâmetros anteriormente determinados pelas simulações como os mais favoráveis à detecção de defeitos, enrolamentos com altura menor que o *shield* e núcleo, mostra uma variação de impedância na presença do defeito significativamente maior que a sonda sem *shield* e que a sonda com altura de enrolamentos maior que a altura do *shield*,

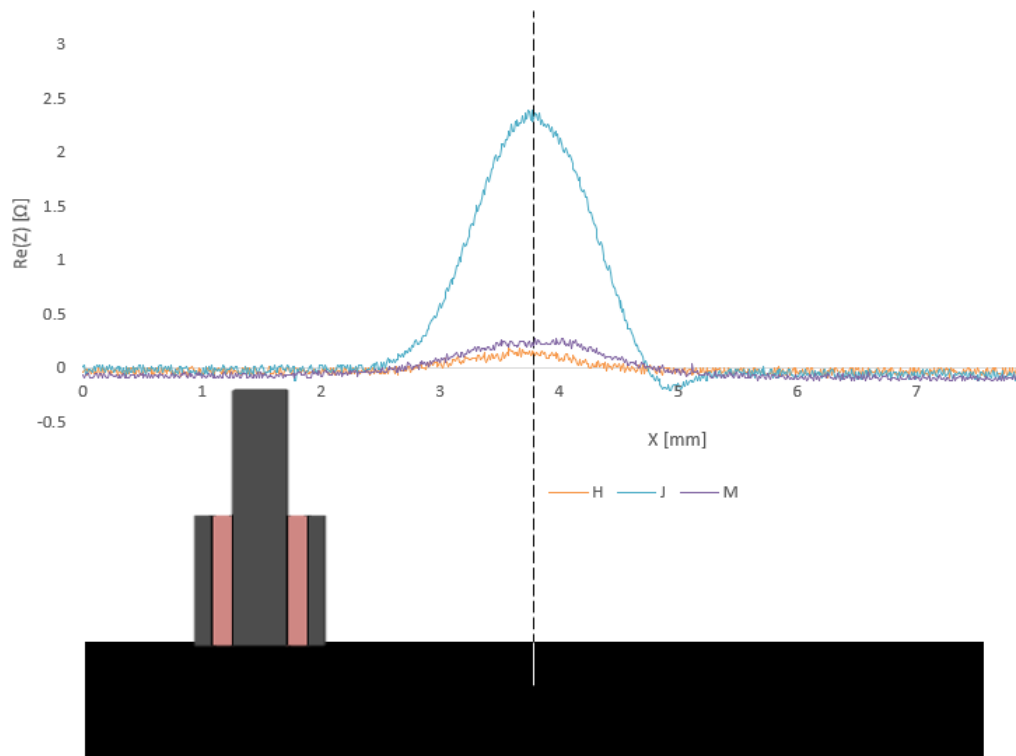
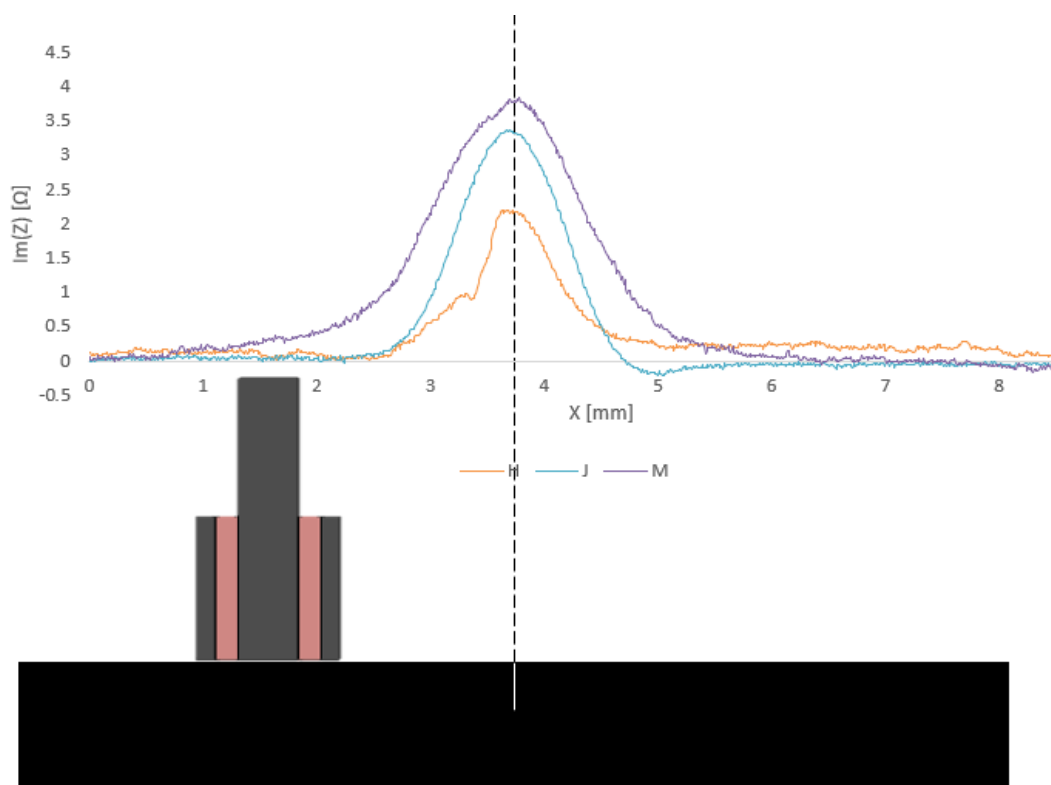


Figura 5,2 - Comparação dos gráficos de impedância da sonda H, J, M, à frequência 3,5 MHz com igual ganho,

Para tirar conclusões sobre a largura da variação de impedância na presença do defeito na inspeção com as sondas H, J e M foram realizadas inspeções com a mesma frequência que os ensaios anteriores, 3,5 MHz, mas com ganhos diferentes, Nesta comparação, **Figura 5,3**, é possível verificar que a sonda sem *shield* é também a que mostra uma variação registada em maior comprimento enquanto que as outras duas sondas mostram resultados muito semelhantes,



(b)

Figura 5,3 – Comparação dos gráficos de impedância da sonda H, J e M à frequência 3,5 MHz com ganhos diferentes para cada sonda,

As sondas A e D são comparadas diretamente por ambas terem shield e núcleo com dimensões iguais e 100 enrolamentos, mas enquanto a sonda A tem altura de enrolamentos de 4,6 mm a sonda D tem 3,8 mm de altura de enrolamentos, representação na **Tabela 5,2**,

Tabela 5,2 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com 100 enrolamentos utilizadas na inspeção ao defeito padrão,

Representação		
Denominação	A	D

Os sinais da inspeção com igual ganho e frequência 1 MHz ao defeito padrão realizada com as sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente com 100 enrolamentos foram comparados na **Figura 5,4** onde é possível verificar que, analogamente aos resultados obtidos no capítulo anterior, a sonda com altura de enrolamentos igual à altura do *shield* concentra o campo magnético no centro da sonda e induz um campo de CI com mais densidade na peça e apresentando uma variação de impedância maior e mais extensa que a sonda com altura de enrolamentos maior do que a altura do *shield*,

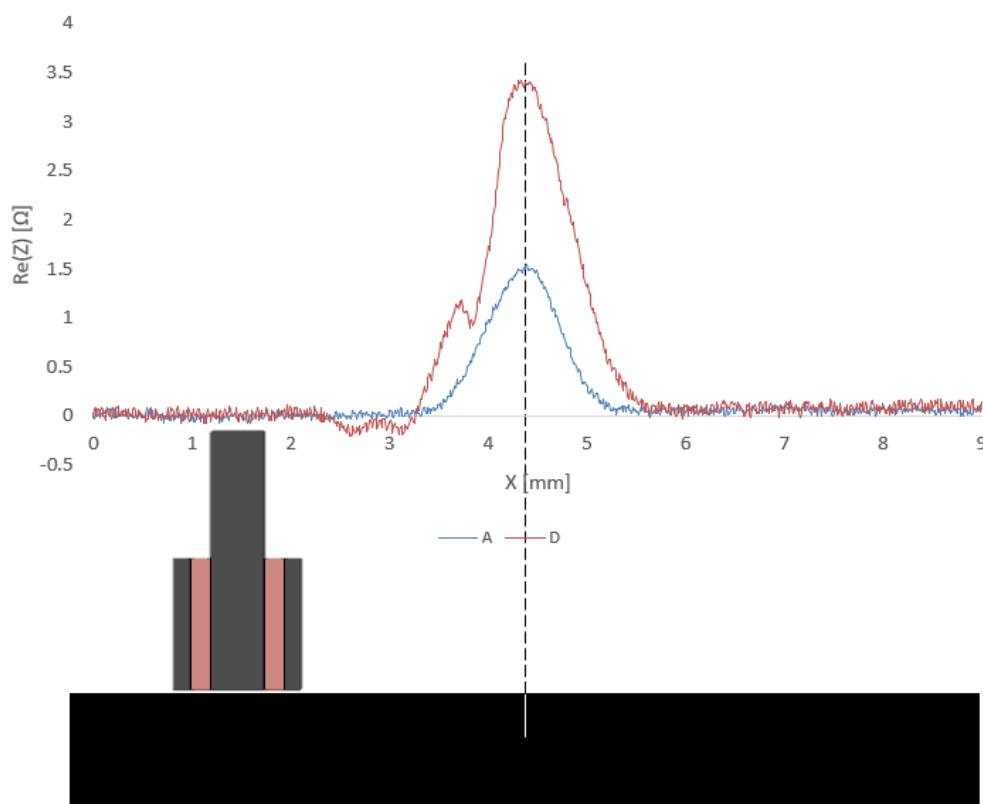


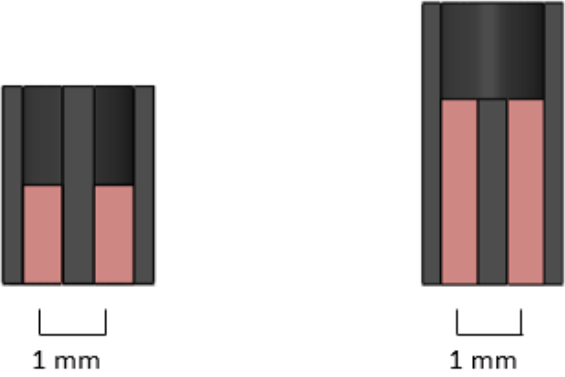
Figura 5,4 - Comparação dos gráficos de impedância da sonda A e D, à frequência 1 MHz com igual ganho,

Foram obtidas sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente para obter bobinas com menores dimensões que as produzidas manualmente, tentar minimizar irregularidades e inconsistências das bobinas manufaturadas e garantir repetibilidade do processo,

As sondas enroladas industrialmente não puderam ser comparadas diretamente com as sondas enroladas manualmente por terem elementos com características diferentes, A representação dos diferentes elementos das bobinas pode ser verificada na **Tabela 5,3**, na bobina

com 200 enrolamentos a altura de enrolamentos, 1,25 mm, é menor que a dos outros elementos, 2,5 mm, enquanto que a bobina com 400 enrolamentos com a mesma altura do núcleo, 2,5 mm, foi montado com um *shield* com maior altura, 3,8 mm,

Tabela 5,3 - Representação e características das sondas enroladas industrialmente utilizadas na inspeção ao defeito padrão,

Representação		
	1 mm	1 mm
Nº Enrolamentos	200	400
Denominação	LT-200	LT-400

Os resultados das inspeções realizados com sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente podem ser verificados na **Figura 5,5**,

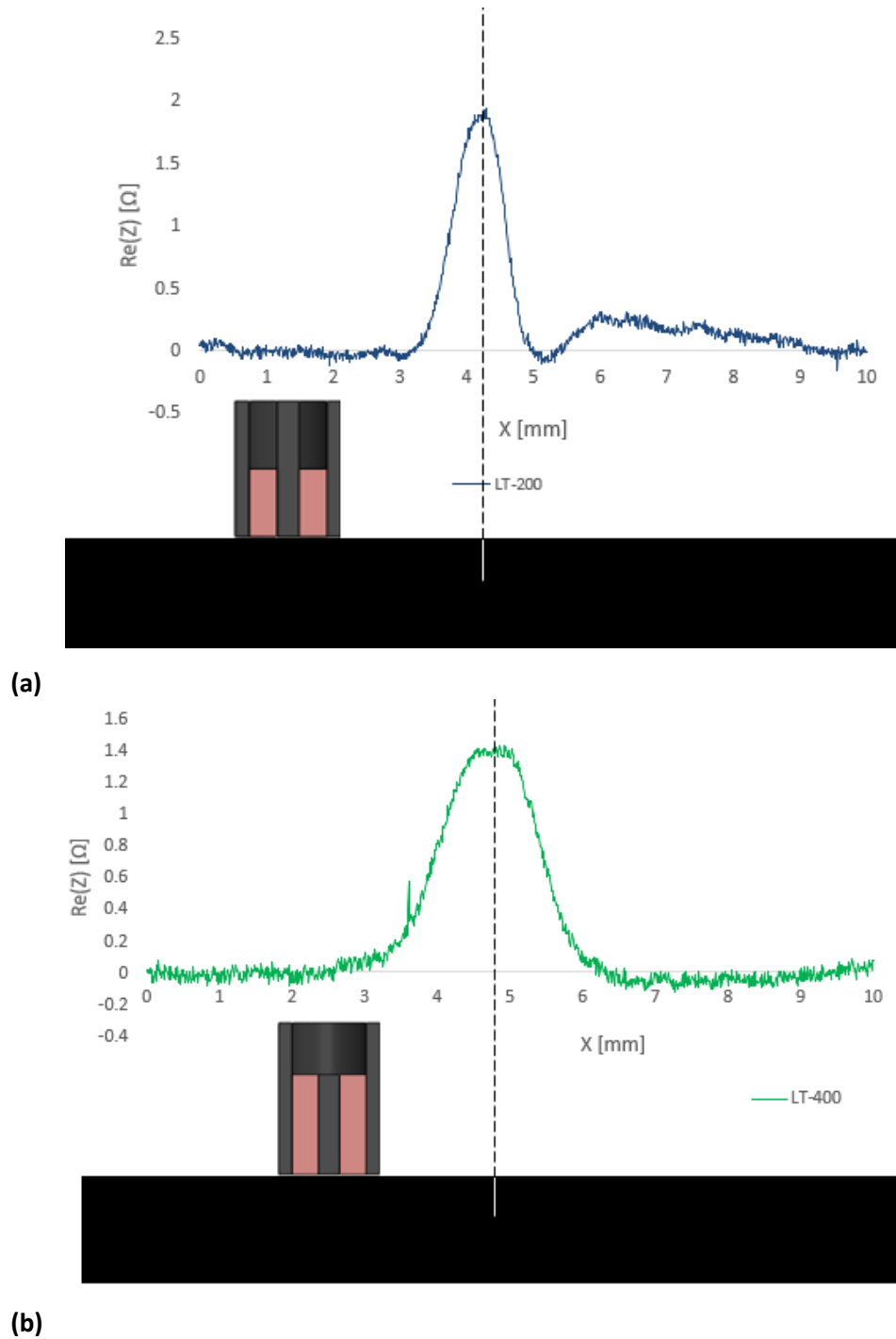


Figura 5,5 – Gráfico de impedância elétrica da sonda, **(a)** LT-200, **(b)** LT-400,

Na bobina produzida industrialmente com 200 enrolamentos, estes têm menor altura que os outros elementos montados e estão concentrados num volume menor do que os enrolamentos das sondas anteriores, o diâmetro da bobina é menor e assim a variação de impedância registado na inspeção a 2,5 MHz foi maior e ocorreu num comprimento menor que na sonda com a bobina com 400 enrolamentos que possui uma relação entre as alturas do núcleo, *shield* e enrolamento, que de acordo com os resultados obtidos no subcapítulo §4.2, vai induzir menos correntes no

material e criar um campo magnético menos intenso e, como se verifica no resultado experimental, a variação de impedância vai ser menor e mais larga,

5.3 - Inspeção do Cordão Brasado a Laser

As sondas criadas vão ser validadas na inspeção de cordões brasados a laser utilizados na indústria automóvel, Como desenvolvido no subcapítulo §2.4 é necessário verificar a existência de defeitos que possam comprometer a ligação,

Não foram comparados os resultados obtidos com as sondas com igual número de enrolamentos por já terem sido tiradas as conclusões referentes ao assunto na inspeção do defeito padrão que colaboraram os resultados obtidos nas simulações numéricas, Assim foi analisada a capacidade de as sondas detetarem defeitos superficiais e subsuperficiais no cordão brasado a laser,

Os defeitos inseridos no artificialmente no cordão podem ser verificados na **Figura 5,6** onde o Defeito 1 é relativo ao defeito superficial e o Defeito 2 um furo passante no centro do cordão que não afeta a superfície, defeito subsuperficial,

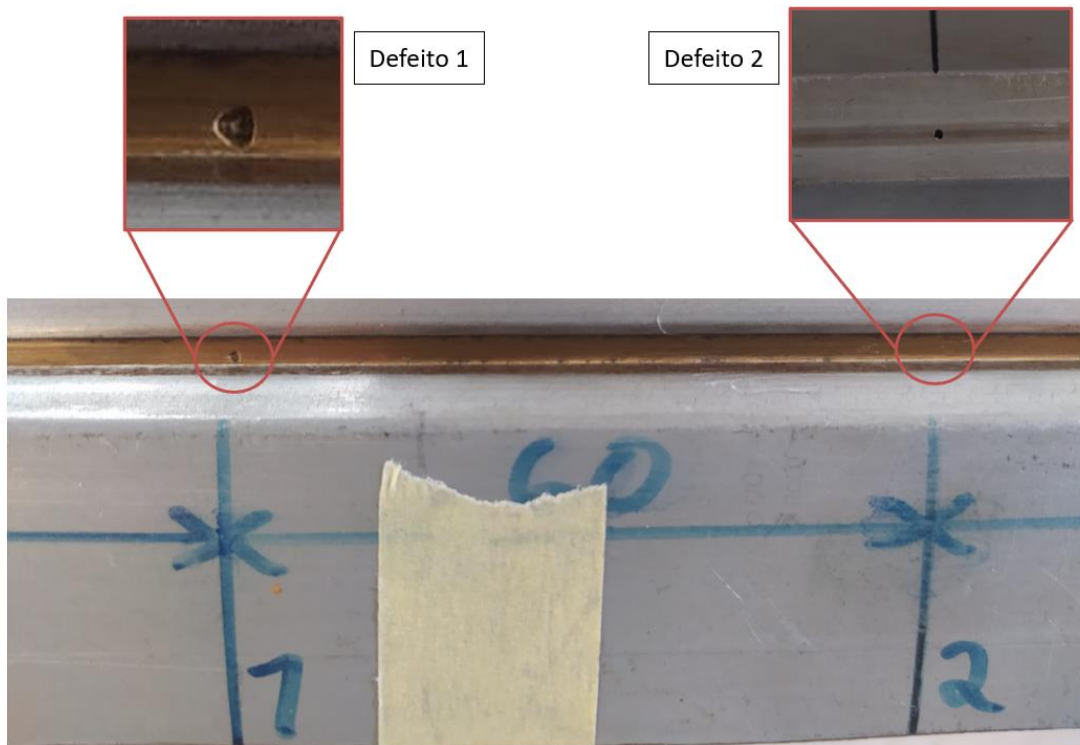


Figura 5,6 - Cordão brasado a laser e a localização do defeito superficial, defeito 1, defeito subsuperficial, defeito 2,

O cordão foi montado na Mesa XY para proceder aos ensaios, **Figura 5,7**, com o cuidado de manter o cordão brasado a laser coincidente com a direção do ensaio,

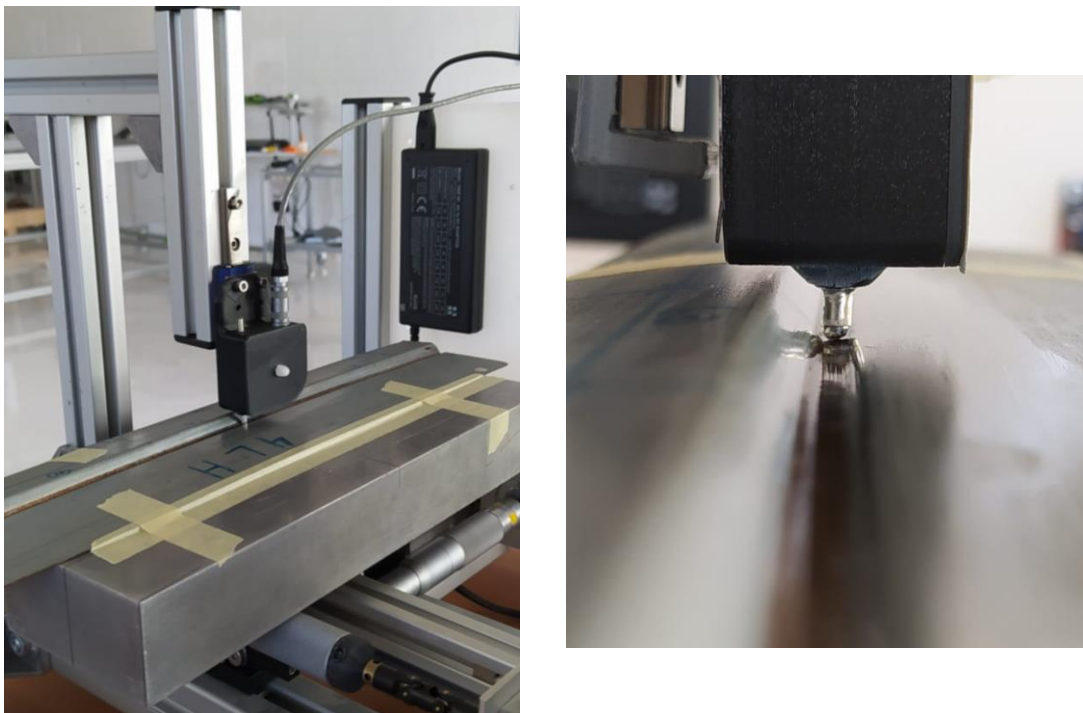
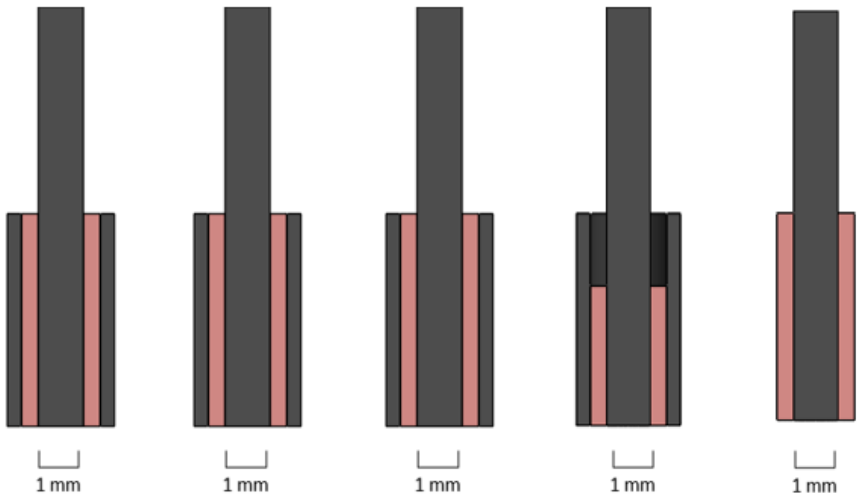


Figura 5,7 - Montagem na Mesa XY,

Para a inspeção ao defeito superficial os ensaios foram realizados a frequências mais altas, do que as frequências utilizadas na inspeção ao defeito subsuperficial na tentativa de concentrar as correntes na superfície,

As sondas escolhidas para realizar a inspeção ao defeito superficial foram as sondas com: 170 enrolamentos, Sonda G; 20 enrolamentos, Sonda M, H e J e 30 enrolamentos, Sonda I e estão representadas na **Tabela 5,4** onde também se pode encontrar a informação relativa ao número de enrolamentos de cada sonda,

Tabela 5,4 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente utilizadas na inspeção ao Defeito Superficial,

Representação					
	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
Nº enrolamentos	170	20	30	20	20
Denominação	G	H	I	J	M

Na **Figura 5,8** é apresentada a comparação dos resultados dos diferentes ensaios realizados para a inspeção do Defeito superficial com o ganho máximo do instrumento de inspeção,

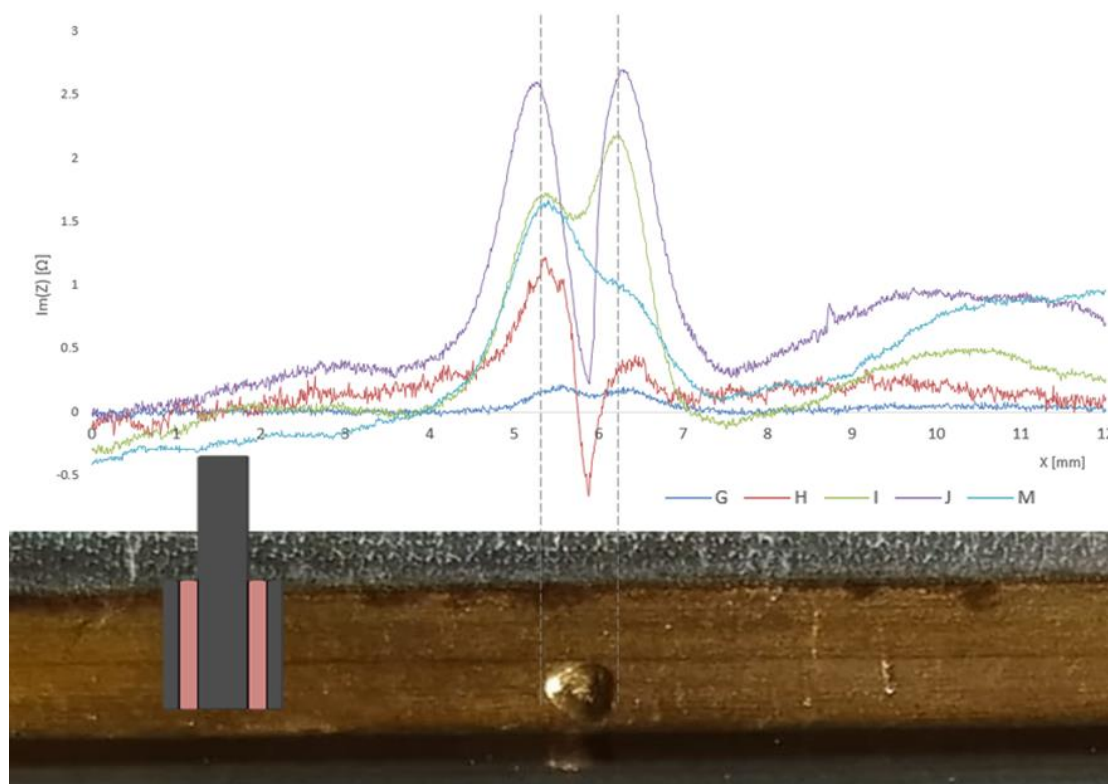


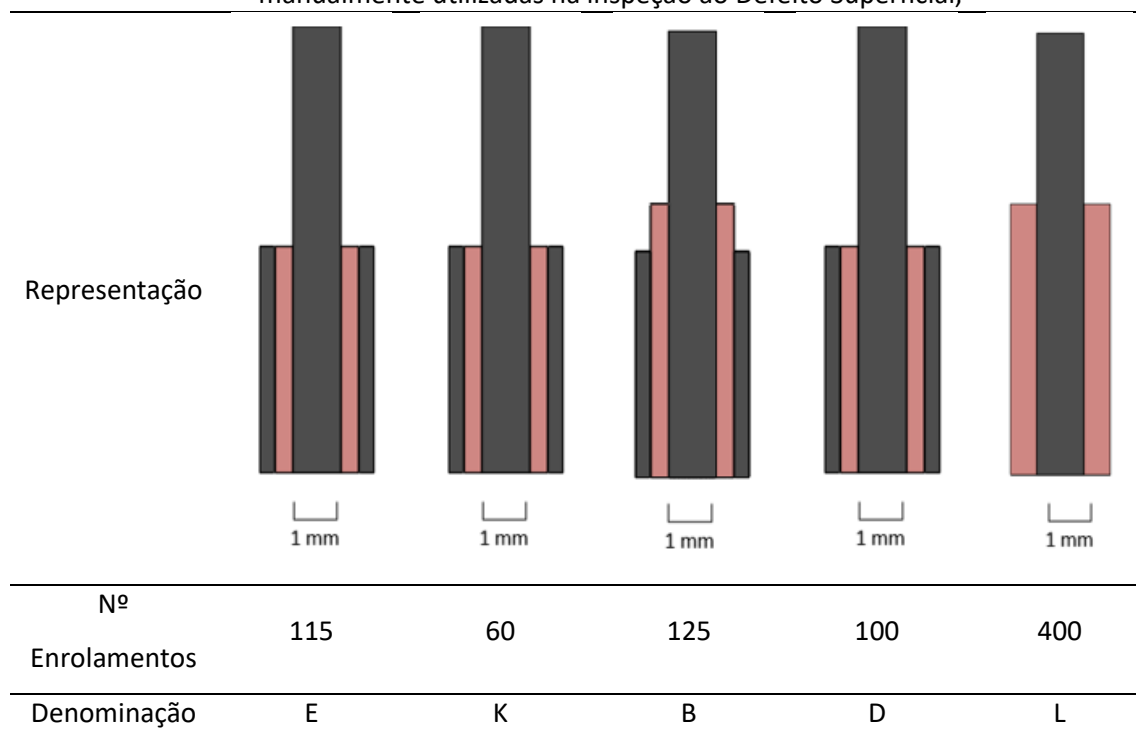
Figura 5,8 - Gráfico de impedância elétrica da Sonda G, H, I, J e M com a representação da lima, localização do defeito e sonda,

É possível verificar a variação de impedância relacionada com o início e fim do defeito Superficial nas inspeções com as sondas com menos enrolamentos, em especial nos ensaios realizados com a Sonda J que tem um baixo número de enrolamentos, apenas 20, com menor altura que a dos outros elementos montados que, em concordância com os resultados obtidos nas simulações numéricas vai induzir mais correntes na peça,

Nos ensaios realizados com as outras sondas com 20 e 30 enrolamentos também é possível verificar uma variação clara correspondente ao início e fim do defeito e é obtido um sinal claro, no entanto, a sonda com 20 enrolamentos sem *shield* mostra uma amplitude do pico na região do defeito baixa e difícil de localizar, Também é apresentado o sinal da sonda com 170 enrolamentos com um pico pouco pronunciado do início e fim do defeito e contaminado por ruído,

Para a inspeção do defeito subsuperficial, Defeito 2, foram usadas sondas com maior número de enrolamentos e frequência ótima mais baixa que produza um campo de CI a maior profundidade capaz de detetar o defeito e também uma sonda com as características opostas no intuito de comparar os resultados obtidos, As sondas escolhidas e as suas características estão representadas na **Tabela 5,5**,

Tabela 5,5 - Representação e características das sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente utilizadas na inspeção ao Defeito Superficial,



Na **Figura 5,9** é apresentada a comparação do sinal elétrico da sonda com: 400 enrolamentos, Sonda L; sonda com 125 enrolamentos, Sonda B; sonda com 115 enrolamentos, Sonda E; sonda com 100 enrolamentos, Sonda D e sonda com 60 enrolamentos, Sonda K usando igual ganho no instrumento de inspeção e frequências mais baixas que nos ensaios apresentados anteriormente, 200 kHz,

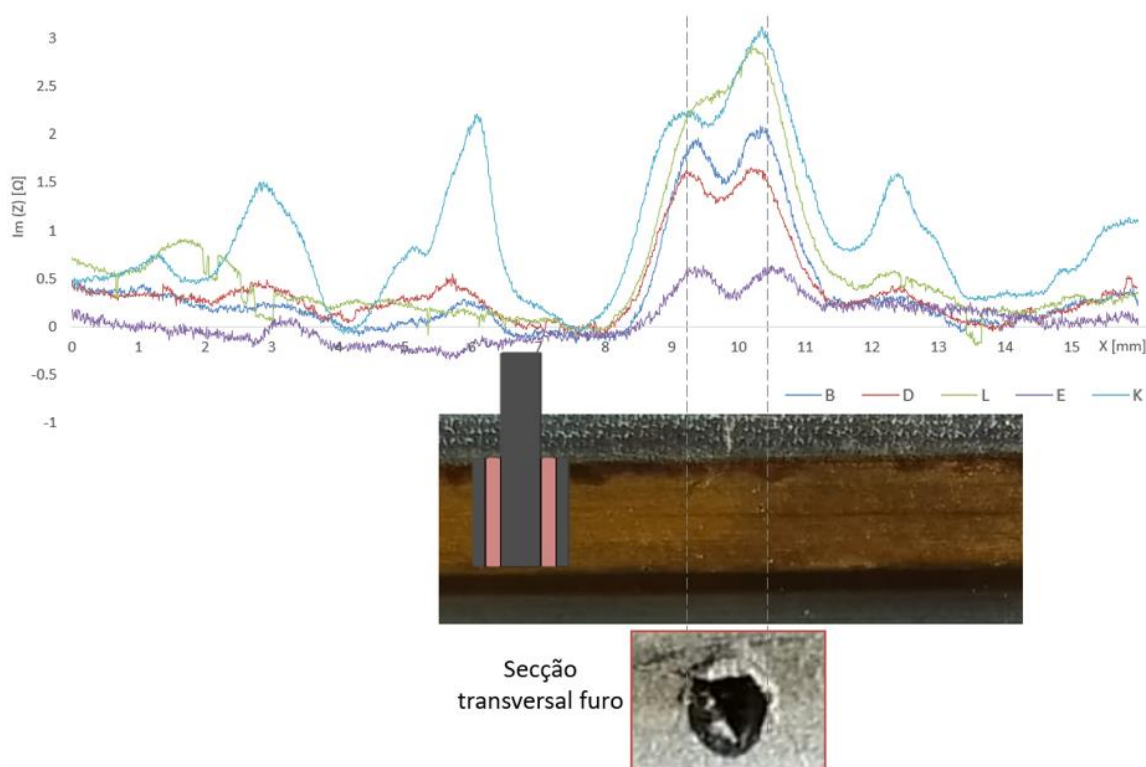


Figura 5,9 - Gráfico de impedância elétrica da Sonda E, K, B, D e L; com a representação da lima, localização do defeito e sonda,

A sonda com mais enrolamentos, Sonda L com 400 enrolamentos, verifica uma melhor relação sinal/ruído com amplitude de pico mais pronunciado que o das outras sondas embora registrado num comprimento maior, por não ter sido montada com *shield*,

Para realizar os END com as sondas de CI foi necessário limpar o cordão porque este já apresentava oxidação na sua superfície que podia interferir com os ensaios, No entanto, devido à sensibilidade das sondas, é possível que irregularidades na superfície que ocorreram no seguimento da limpeza ou oxidação que não tenha sido retirada com sucesso tenha afetado os ensaios, Este fenómeno pode explicar o ruído facilmente detetado no sinal da Sonda K com 60 enrolamentos que por concentrar o campo de CI na superfície deteta com mais facilidade as interrupções no cordão, mas estas também são detetadas com menor amplitude nos sinais das outras sondas com uma variação de impedância menor,

5.4 - Inspeção de Limas de Endodontia

As sondas customizadas e anteriormente caracterizadas vão ser utilizadas para a inspeção da lima rotativa Hyflex CM 20/,04, Como referido no subcapítulo 2.5.2, esta lima tem conicidade de

4%, um diâmetro de ponta, D_1 , de 0,25 mm e um diâmetro no final da zona ativa de corte, D_{16} , de 0,84 mm, como representado na **Figura 5,10**,

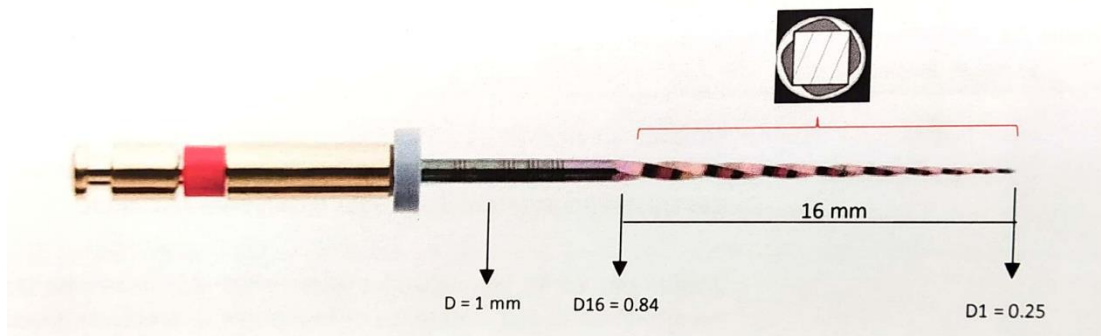


Figura 5,10 - Lima rotativa Hyflex CM 20/,04 [3],

Foi introduzida artificialmente uma fissura severa, com as dimensões 0,4x0,35x0,1 a 5 mm na ponta da lima HyFlex CM, possível de verificar na **Figura 5,11**,

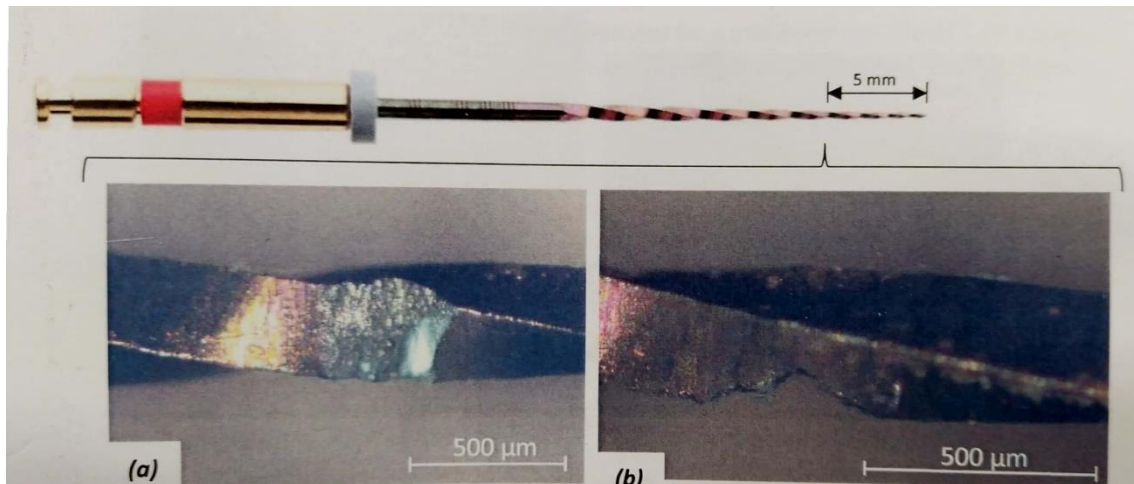


Figura 5,11 - Lima rotativa HyFlex CM 20/,04 e a localização do defeito introduzido artificialmente; **(a)** Vista de topo; **(b)** Vista lateral, adaptado de [3],

Para a inspeção com as Sondas Helicoidais Cilíndricas enroladas manualmente, as sondas foram fixas ao braço da Mesa XY e a lima presa no Suporte Horizontal com o defeito visível, **Figura 5,12**,

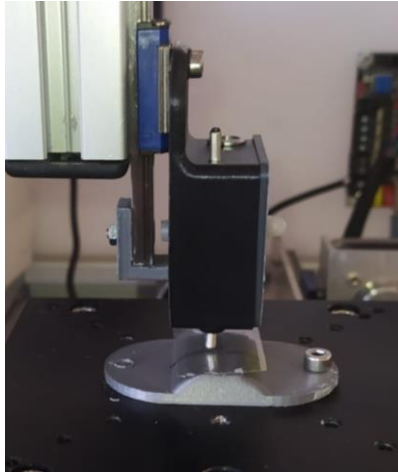


Figura 5,12 - Montagem das Sondas helicoidais cilíndricas produzidas manualmente no braço da Mesa XY,

São comparadas sondas enroladas manualmente com diferente número de enrolamentos, Dos vários resultados obtidos estão apresentados na **Figura 5,13** os da Sonda B, G, I e K com 125, 170, 30 e 60 enrolamentos respetivamente, montadas com shield, com as diferentes dimensões dos diferentes elementos descritas no subcapítulo §3.3,

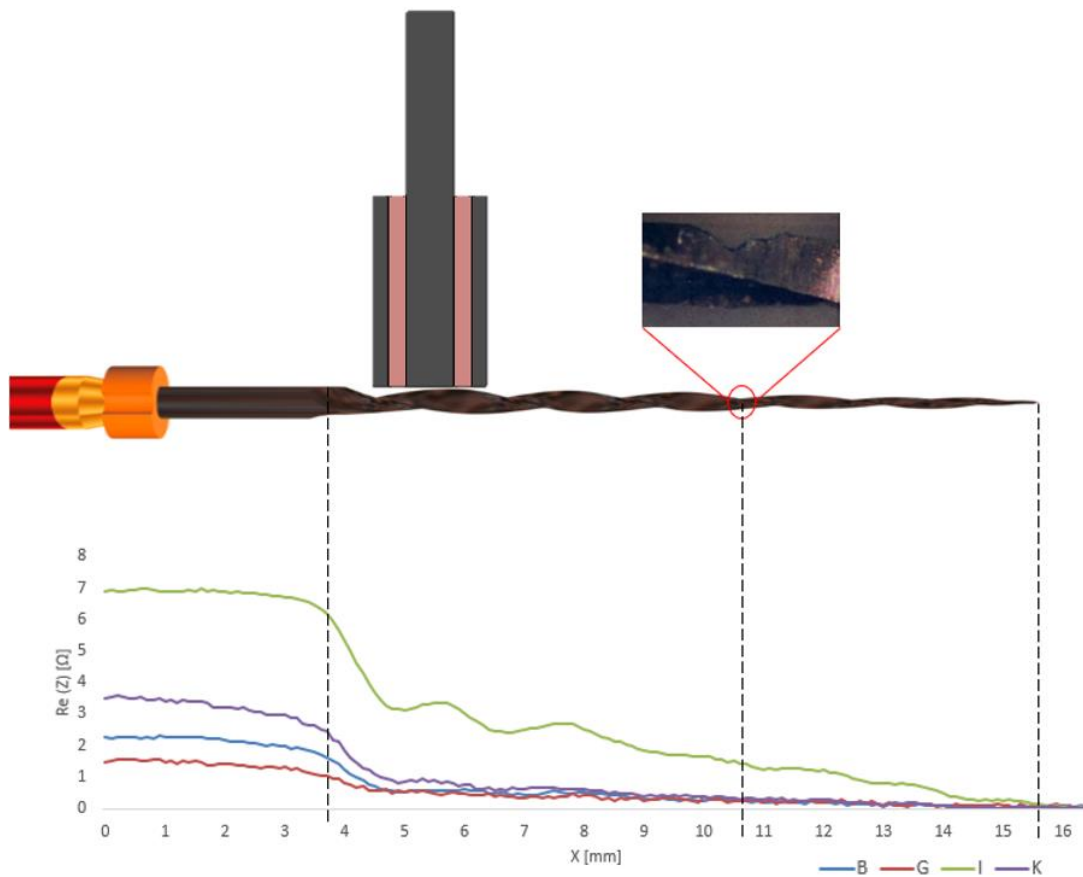


Figura 5,13 - Comparação dos gráficos de impedância das sondas diferenciais B, G, I, K,

Em todos os sinais obtidos é possível identificar a zona com maior diâmetro e a variação de diâmetro até à ponta da lima. As sondas com menor número de enrolamentos com frequência ótima mais alta concentram as correntes induzidas a menor profundidade e é obtida uma variação de impedância correspondente às diferentes espirais do instrumento. Em nenhuma das sondas é possível localizar claramente o defeito,

As sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente, designadas por LT, foram montadas na Mesa XY para a inspeção à lima de endodontia de modo a que a sonda esteja fixa no Braço da Mesa XY e sempre encostada à Lima, fixa no Suporte Horizontal, como pode ser verificado na **Figura 5,14**,

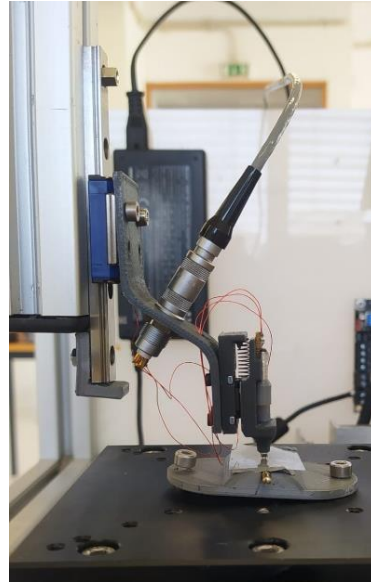
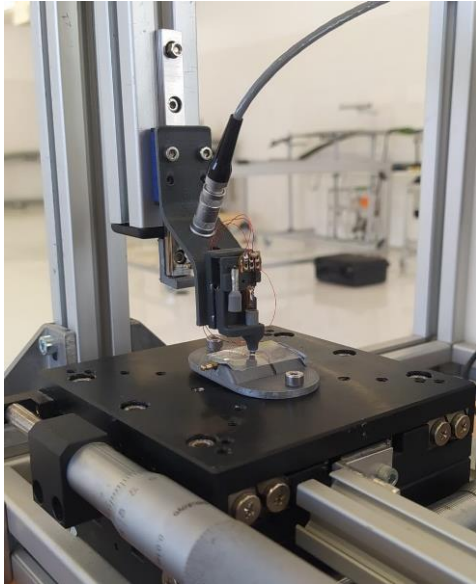
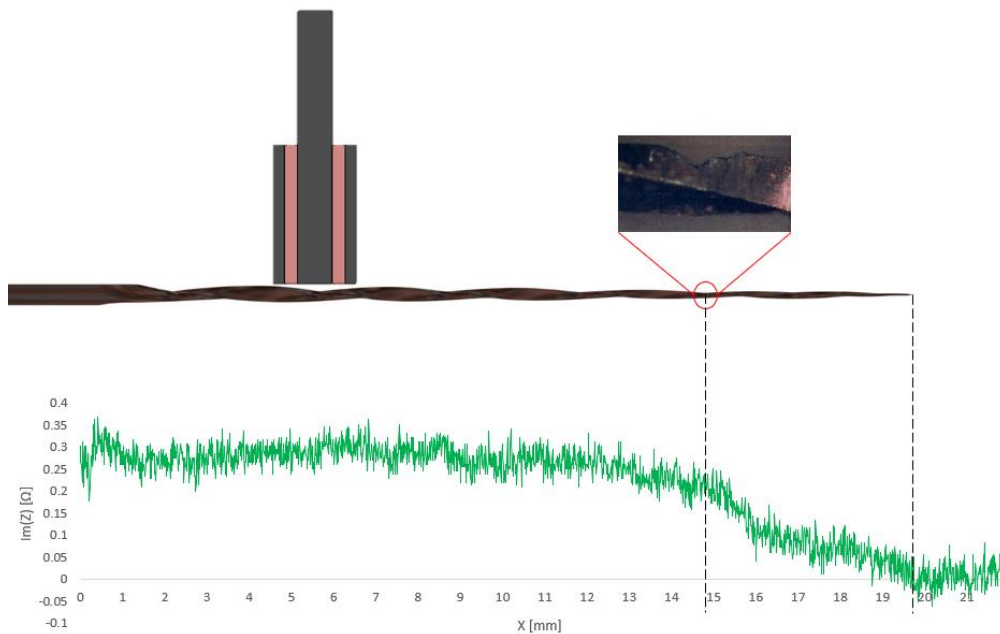
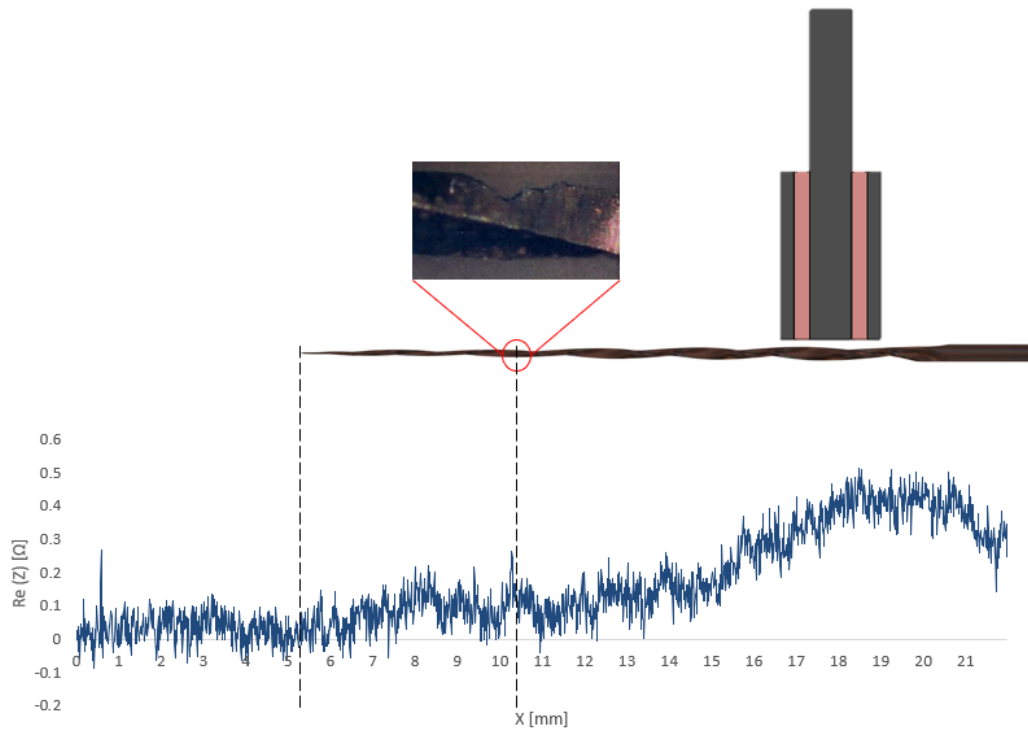


Figura 5,14 - Montagem para inspeção de limas de endodontia com a sonda helicoidal cilíndrica enrolada industrialmente,

Os resultados obtidos com o ganho máximo do dispositivo de inspeção a 2 MHz com a sonda com 400 enrolamentos podem ser verificados na **Figura 5,15 – (a)** e da sonda com 200 enrolamentos na **Figura 5,15 – (b)**,



(a)



(b)

Figura 5,15 - Variação da impedância elétrica registada nas sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente com designação **(a)** LT-400 e **(b)** LT-200 à sua frequência ótima com a representação da lima e sonda à escala,

Nas sondas enroladas industrialmente, apesar de terem menores irregularidades, têm uma relação sinal/ruído pior que as anteriores e não é possível verificar a variação de diâmetro dos dentes da hélice nem a localização do defeito,

A montagem foi alterada para fazer a inspeção da lima com as sondas desenvolvidas para inspecionar a lima de endodontia, sonda com geometria semicircular, denominada Sonda W, e toroidal, Sonda Z. A sua montagem da Mesa XY é feita de modo a que a lima, envolvida numa manga termo retrátil, se movimente encostada à bobina com um *lift-off* constante. Na **Figura 5,16** está representada a montagem da sonda semicircular na Mesa XY,

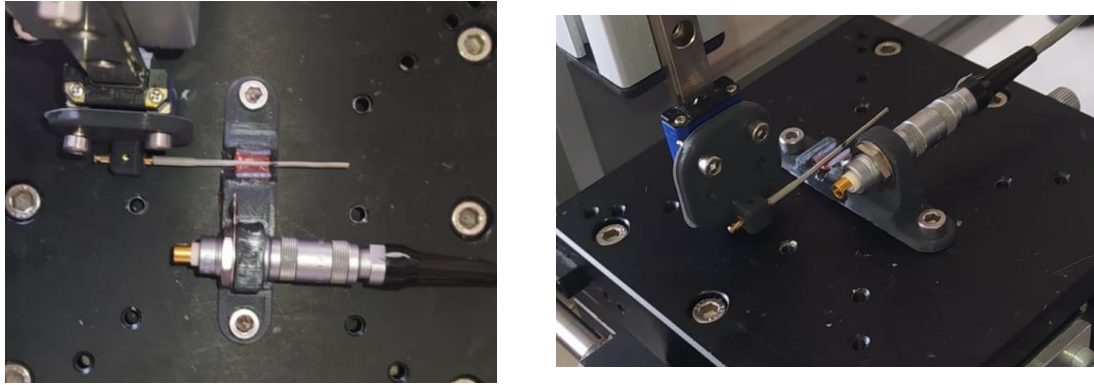


Figura 5,16 - Montagem para inspeção de Limas de endodontia com a Sonda com Geometria Semicircular,

Os resultados obtidos com a sonda semicircular a 2 MHz e com o ganho máximo do dispositivo de inspeção nos ensaios à lima de endodontia com defeito encostado aos enrolamentos, Ensaio A, podem verificados na **Figura 5,17**,

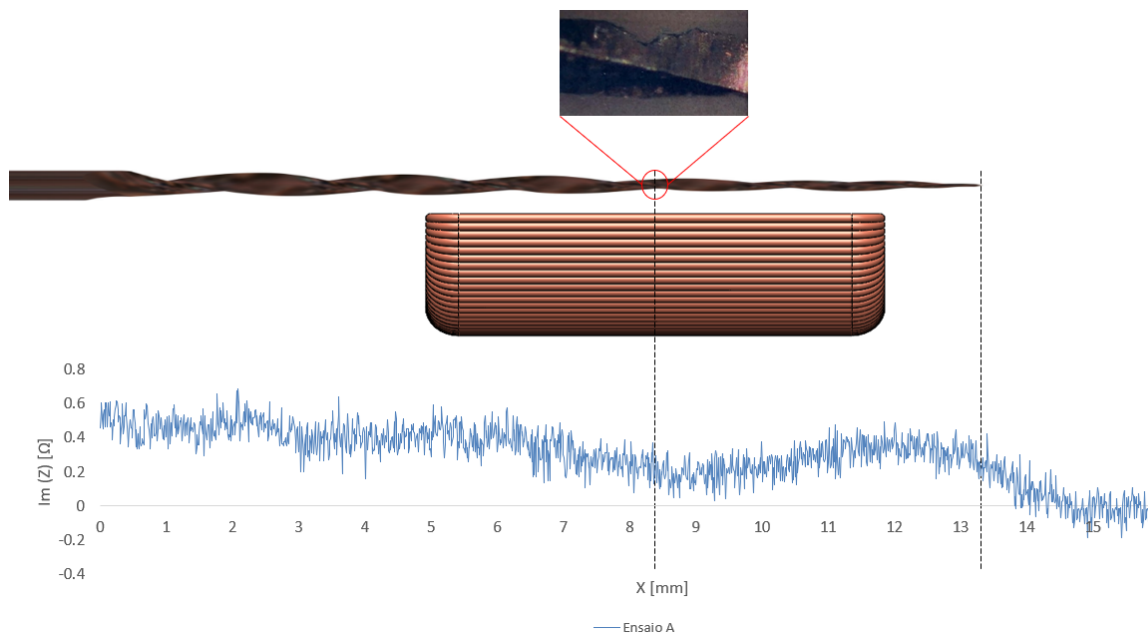


Figura 5,17 – Variação da Impedância elétrica no Ensaio A com a sonda semicircular a 2 MHz com o ganho máximo do instrumento de inspeção e representação da posição do defeito, lima e sonda,

Os resultados anteriores foram comparados ao da inspeção da lima sem defeitos, Ensaio B, na **Figura 5,18**, Ambos os ensaios foram realizados com o mesmo ganho e frequência,

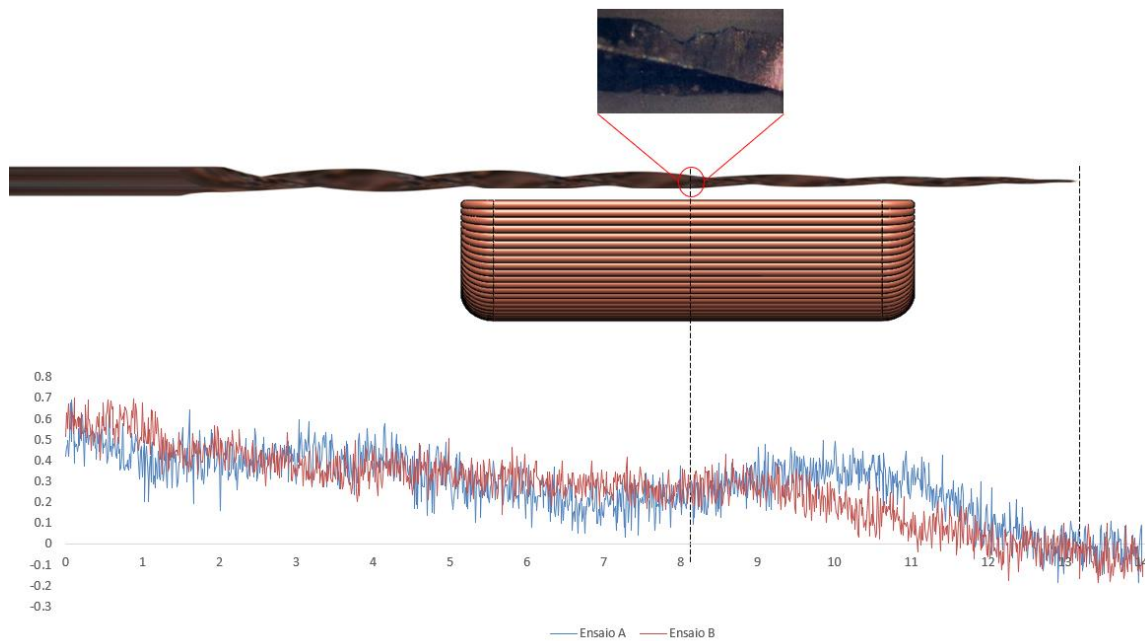


Figura 5,18 - Comparação dos resultados da inspeção com a sonda semicircular no Ensaio A e Ensaio B a 2 MHz com ganho máximo no aparelho de inspeção com a representação da lima, localização do defeito e Sonda W,

No ensaio realizado com ganho máximo do aparelho realizados com a sonda com geometria semicircular é facilmente reconhecida a inclinação da lima e onde esta acaba, Os ensaios foram realizados com ganho máximo do aparelho, mas foi registada uma variação de impedância baixa na presença do defeito na lima, Quando comparados os ensaios realizados à lima de endodontia com e sem defeito é possível verificar uma alteração na zona do defeito embora o ruído a torne pouco clara,

A sonda com geometria circular, Sonda Z, foi montada na Mesa XY de modo a que o eixo da lima, envolvida na manga termo retrátil, se encontre sempre colinear com o eixo das bobinas, **Figura 5,19,**

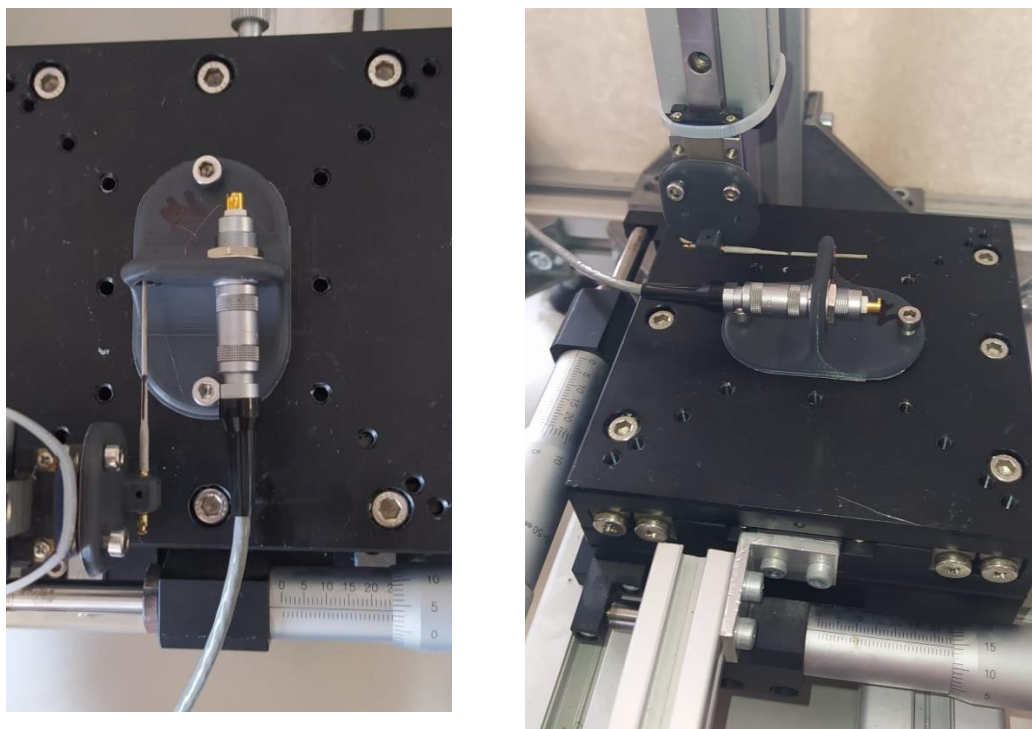


Figura 5,19 - Montagem para inspeção de limas de endodontia com a Sonda toroidal,

Com a sonda a trabalhar de modo absoluto foram obtidos os resultados da **Figura 5,20 – (a)** onde o ruído do sinal não permite identificar a localização do defeito da sonda nem do fim da lima por isso optou-se por montar a sonda em modo diferencial e foram obtidos os resultados da **Figura 5,20 – (b)** onde já é possível verificar variações mais claras na localização do defeito e do fim da lima,

Ambos os ensaios foram realizados com o ganho máximo do dispositivo de inspeção com 2 MHz de frequência, Devido à dimensão da lima e das diferentes configurações das sondas não foi possível colocar a lima na mesma posição nas diferentes montagens sendo por isso obtido uma localização diferente do defeito para cada ensaio,

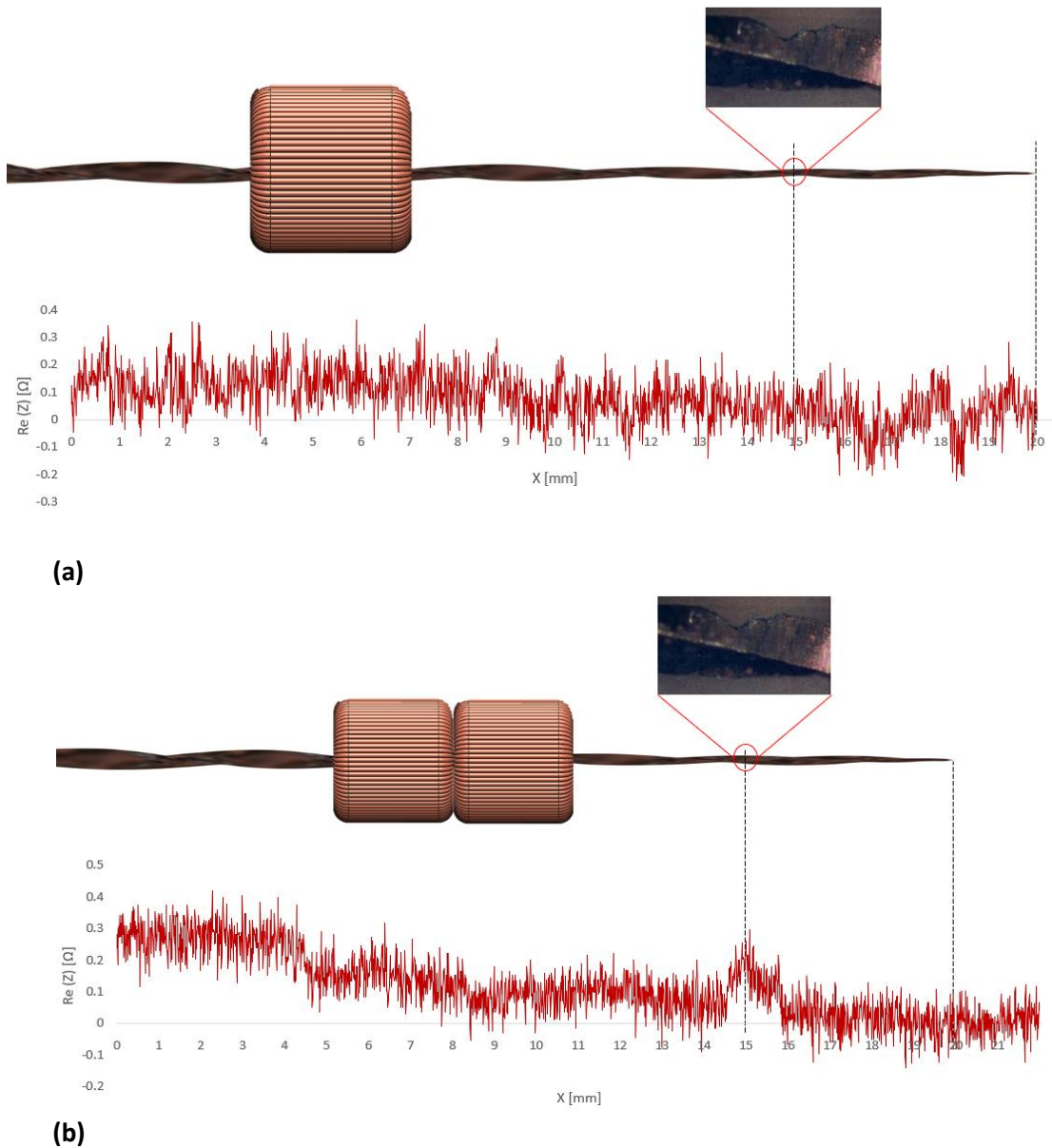


Figura 5,20 - Variação da impedância elétrica registada com a Sonda Z montada **(a)** com uma bobina em modo absoluto e **(b)** com duas bobinas em modo diferencial com ganho máximo do aparelho de inspeção e frequência 2 MHz com a representação da lima, defeito e sonda,

5.5 - Mapeamentos de condutividades

Para testar as capacidades da Mesa XY foi realizado um mapeamento de condutividade com as sondas helicoidal cilíndricas desenvolvidas anteriormente com 100 espiras, Numa placa de polímero, material não condutor, foram coladas fitas de alumínio e realizado o mapeamento numa área de 30x30 mm com resolução de 0,1 mm em X e Y, A placa criada pode ser verificada na **Figura 5,21** com o retângulo, a vermelho, da área inspecionada,

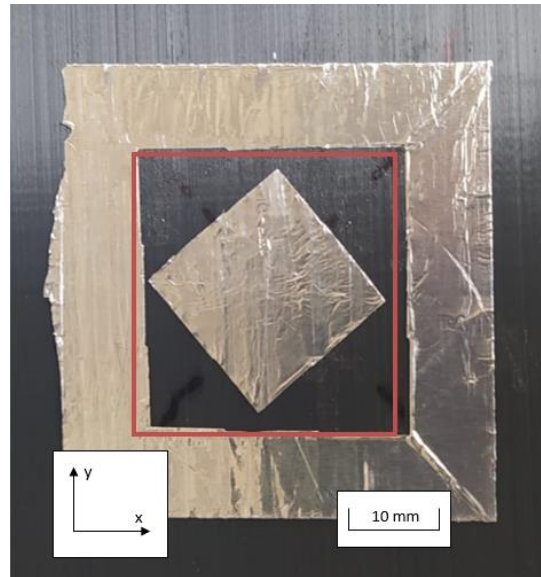


Figura 5,21 - Placa de teste criada para mapeamento de condutividades e representação, a vermelho, da área inspecionada,

A montagem na Mesa XY foi feita de modo a que a placa ficasse segura no prato móvel com uma folha de acetato a cobrir a zona a inspecionar para garantir *lift-off* constante em toda a operação, **Figura 5,22**,

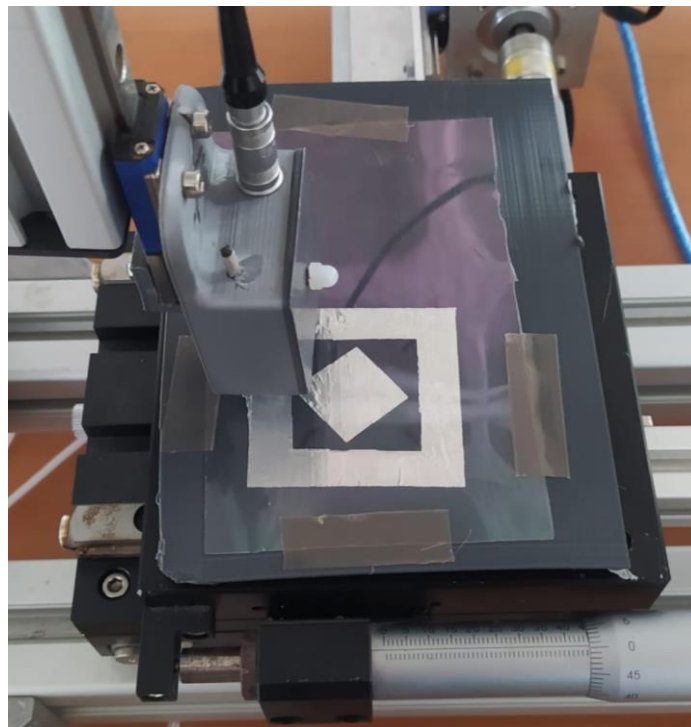


Figura 5,22 - Montagem na Mesa XY da placa para mapeamento de condutividades,

Foi realizada a inspeção com a sonda helicoidal cilíndrica enrolada manualmente com 200 enrolamentos designada por Sonda C com 1 MHz de frequência e 80 de ganho. Os resultados obtidos estão comparados com a região inspecionada na **Figura 5,23**, onde é identificada claramente a forma trapezoidal desenhada,

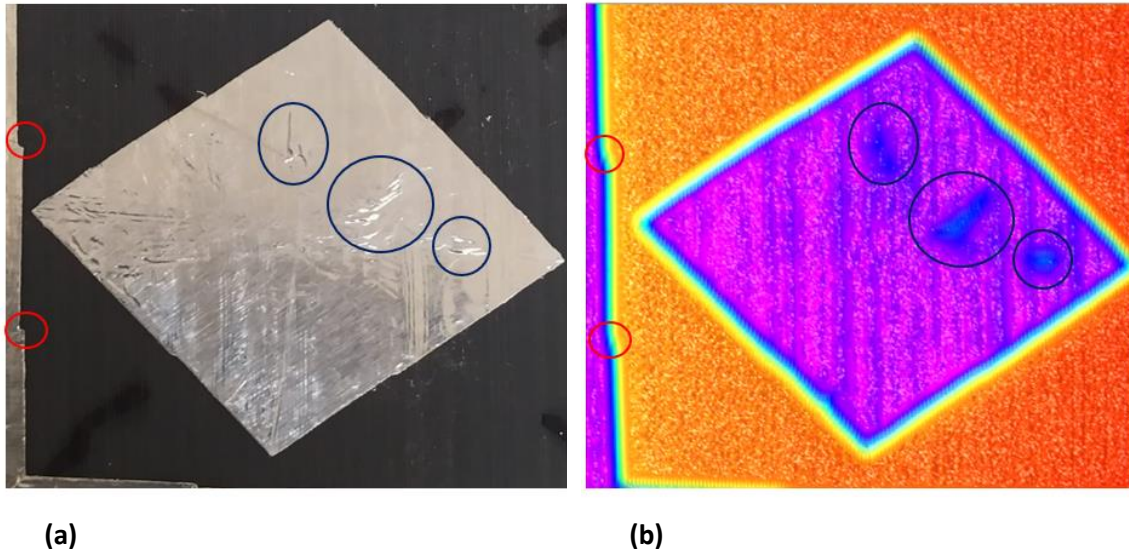


Figura 5,23 – Comparação entre: **(a)** região inspecionada e **(b)** resultados da parte real da indutância resultante do ensaio com a sonda helicoidal cilíndrica com 200 enrolamentos a frequência 2 MHz com algumas das regiões de interesse assinaladas,

As falhas na fita de alumínio, assinaladas a vermelho no lado esquerdo da região, com aproximadamente 0,4 mm de largura, são obtidas também nos resultados da inspeção enquanto que as regiões assinaladas pelos círculos azuis escuros são zonas onde a fita de alumínio não aderiu completamente à placa de compósito resultando em dobras que são também verificadas nos resultados,

5.6 - Síntese do capítulo

Foram usadas as sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente e industrialmente para inspecionaram um defeito padrão com 20 μm de largura, Os resultados da Validação Experimental das sondas enroladas manualmente mostraram-se concordantes com os resultados obtidos nas Simulações Numéricas: sondas com enrolamentos com menor altura que os outros elementos obtêm uma variação de impedância na presença do defeito maior,

Nas inspeções realizadas com as sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente foi obtido um sinal com pior relação sinal/ruído, mas com variação de impedância clara na presença do defeito,

A bobina manufaturada apesar de conter mais irregularidades e inconsistências do que a produzida industrialmente tem elementos com altura maior que criam campos de correntes induzidas e magnéticos mais intensos e concentrados e, por isso, vão criar uma amplitude do pico maior com melhor relação sinal/ruído,

Depois de validar experimentalmente as sondas com as diferentes configurações foram realizadas ensaios experimentais no cordão brasado a laser com dois defeitos inseridos artificialmente descritos no subcapítulo §5.3, Para a inspeção do cordão brasado a laser foram utilizadas as sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente e industrialmente,

Nas inspeções com melhor relação sinal/ruído é possível verificar dois picos, um no início e outro no final do defeito, isto porque as dimensões da sonda permitem obter uma maior resolução e quando a bobina se aproxima do defeito as CI mudam de trajetória e o valor de impedância é alterado mas quando esta se encontra alinhada com a descontinuidade no cordão as correntes induzidas não são perturbadas e por isso a variação de impedância aproxima-se de zero,

As sondas enroladas manualmente com menos enrolamentos que funcionam a uma frequência ótima mais alta foram as que obtiveram melhor relação sinal/ruído e amplitude do pico maior na inspeção ao defeito superficial,

No entanto as sondas helicoidais cilíndricas enroladas industrialmente, por serem tão sensíveis, o sinal foi contaminado por ruído com amplitude próxima da amplitude do pico relativo ao defeito,

Os ensaios experimentais no instrumento HyFlex CM 20/04 com um defeito inserido artificialmente descrito no subcapítulo §5.4 foram realizados com as sondas validadas anteriormente e com as sondas com geometria toroidal e semicircular,

As sondas helicoidais cilíndricas, apesar das suas pequenas dimensões e capacidade em detetar falhas de pequenas dimensões como comprovado na inspeção dos cordões brasados a laser, não se mostraram capazes de detetar o defeito na lima,

A sonda com geometria semicircular só tem enrolamentos em meio perímetro assim há dificuldade acrescida em detetar o defeito se este não se encontrar junto aos enrolamentos,

Outro obstáculo à facilidade de leitura da inspeção da lima de endodontia é a diferença do comprimento da sonda, 8 mm, do comprimento do defeito, 0,4 mm, que alarga a possível variação de impedância resultante da presença do defeito, Embora todos os ensaios com a sonda com geometria semicircular terem sido realizados com o ganho máximo do aparelho de CI, os resultados apresentam demasiado ruído para uma leitura clara do defeito na lima,

A bobina toroidal foi montada de forma absoluta e diferencial, na primeira a relação sinal/ruído não permitia verificar a variação do diâmetro nem localizar o fim da lima, Na montagem com duas bobinas com geometria toroidal verificou-se uma melhoria na relação sinal/ruído, em comparação ao sinal obtido com a sonda anterior, e já é possível verificar uma variação de impedância na presença do defeito,

O mapeamento de condutividades realizado demonstrou a precisão da Mesa XY pequenos detalhes como falhas na fita de alumínio menores que 1 mm são possíveis de localizar o que demonstra a capacidade de a mesa realizar mapeamentos de condutividade com elevada resolução,

6 - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho e referidas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros, Todas as conclusões consideradas relevantes foram apresentadas e analisadas no subcapítulo final de cada capítulo, síntese de resultados, pelo que neste são descritas as conclusões mais importantes que decorrem do trabalho realizado,

6.2 - Conclusões

No decurso deste trabalho foram desenvolvidas 17 sondas helicoidais cilíndricas, das quais 2 foram montadas com pares de bobinas enroladas industrialmente e 15 com pares de bobinas enroladas manualmente, Adicionalmente também foram desenvolvidas 2 sondas diferentes usadas apenas na inspeção da lima de endodontia,

A simulação numérica permitiu descrever adequadamente os fenómenos eletromagnéticos associados às diferentes relações entre as alturas dos diferentes elementos da sonda, As simulações revelaram-se concordantes com a caracterização realizada com o defeito padrão: sondas com altura de enrolamentos mais baixa que a dos outros elementos mostraram uma amplitude de pico maior e melhor relação sinal/ruído,

6.2.1 - Inspeção do cordão brasado a laser

Utilizando o método de correntes induzidas procurou-se detetar um defeito superficial e subsuperficial introduzidos artificialmente no cordão brasado a laser, As sondas mostraram ser capazes de detetar os dois tipos de defeitos,

Foram comparados os sinais de diferentes sondas com diferentes configurações e diferente número de enrolamentos, Na inspeção ao defeito superficial no cordão brasado a laser a sonda com menor número de enrolamentos, 20, e com altura de enrolamentos menor que a alturas dos outros elementos mostraram maior amplitude de pico na presença do defeito na inspeção a 3 MHz embora fosse possível verificar uma variação de impedância no sinal de todas as sondas testadas,

Na inspeção do defeito subsuperficial foram usadas sondas com mais enrolamentos que criaram um campo de CI mais profundo que mostraram capazes de detetar o defeito embora com mais ruído que os resultados obtidos anteriormente, O ensaio realizado com a sonda com mais enrolamentos, 400, utilizando o ganho máximo do instrumento de inspeção a 200 KHz apresentou resultados com maior variação de impedância na localização do defeito e com níveis baixos de ruído tornando a leitura mais clara,

6.2.2 - Inspeção lima de endodontia

As Sondas helicoidais cilíndricas enroladas manualmente e industrialmente não detetaram a fissura introduzida no instrumento endodôntico, no entanto as sondas desenvolvidas com geometria toroidal e semicircular apresentam um sinal de resposta onde é possível verificar uma variação de impedância na presença do defeito com amplitude muito semelhante à de ruído,

É a sonda montada com duas bobinas toroidais com 100 enrolamentos cada que apresenta resultados mais interessantes na inspeção do defeito superficial da lima a 2 MHz, Apesar do sinal apresentar uma variação de impedância na presença da lima pouco clara, é possível verificar um pico na região do defeito,

6.3 - Propostas para Desenvolvimentos Futuros

Com base no trabalho realizado seria interessante simular e testar parâmetros na tentativa de criar sondas toroidais que apresentem melhor resolução na detecção de defeitos em limas de endodontia, Para inspeção da junta brasada a laser seria importante desenvolver sondas que funcionem a altas e baixas frequências evitando a necessidade de duas sondas e respectivos analisadores de impedância, Também seria importante robotizar o processo de inspeção uma vez que se pretende aplicar a milhares de cordões geometricamente idênticos garantido assim uma repetibilidade do movimento e uma maior rapidez do processo,

Seria importante desenvolver sondas com diferentes configurações na tentativa de alargar o estudo da detecção de diferentes micro defeitos com diferentes morfologias,

A mesa XY desenvolvida pode também ser alterada para maior durabilidade e versatilidade, A peça de ligação do micrómetro e motor poderia ser maquinada de modo a reforçar a ligação e montagem ajustada de modo a manter o eixo do braço do micrómetro e motor coaxiais, Também podem ser feitas alterações para desenvolver o movimento no eixo z para realizar medições de dureza,

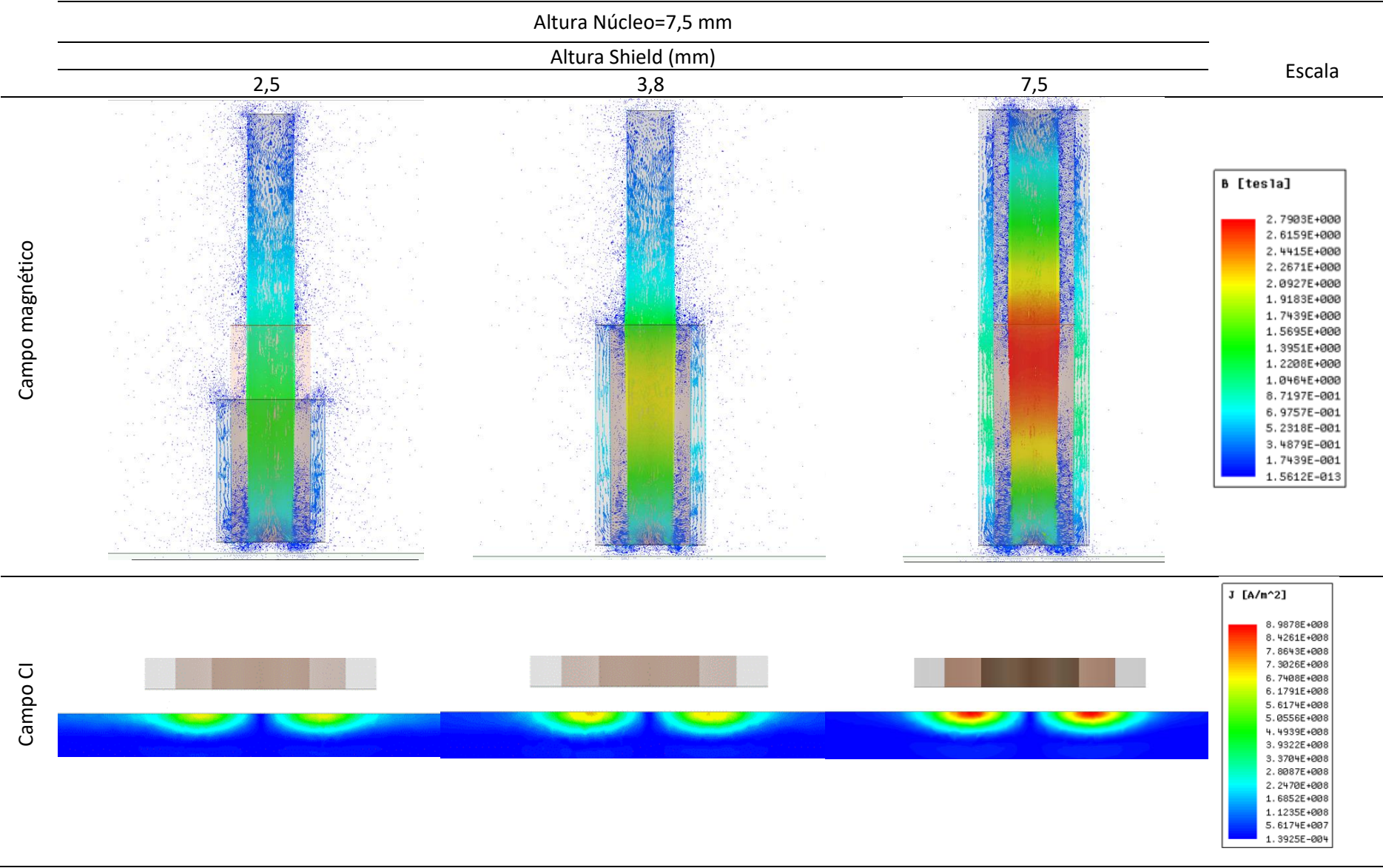
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M, A, Machado, “Development of Non-Destructive Testing by Eddy Currents for Highly Demanding Engineering Applications,” no, December 2018,
- [2] T, Alexandre and R, Marques, “Desenvolvimento de Sondas de Correntes Induzidas Customizadas para Detecção de Micro Defeitos Superficiais,” 2016,
- [3] G, Saldanha, “Avaliação da Resistência à fadiga de Limas de Endodontia Sujeita a Flexão Rotativa e da sua Integridade Estrutural com Recurso à Utilização de Termografia e de Correntes Induzidas,” FCT - UNL, 2019,
- [4] F, P, Almeida, J, Barata, and P, Barros, *Ensaaios não destrutivos*, ,
- [5] B, P, C, Rao, “Eddy Current Testing: Basics,” *J, Nondestruct, Test, Eval*,, vol, 10, pp, 7–16, 2011,
- [6] NDT Resource Center, “Basic Principles of Eddy Current Inspection,” pp, 1–2, 2018,
- [7] K, R, Shao, Y, G, Guo, and J, D, Lavers, “Multiresolution analysis for reconstruction of conductivity profiles in eddy current nondestructive evaluation using probe impedance data,” *IEEE Trans, Magn*,, vol, 40, no, 4 II, pp, 2101–2103, 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.832264,
- [8] J, García-Martín, J, Gómez-Gil, and E, Vázquez-Sánchez, “Non-destructive techniques based on eddy current testing,” *Sensors*, vol, 11, no, 3, pp, 2525–2565, 2011, doi: 10.3390/s110302525,
- [9] NDT Resource Center, “Depth of Penetration & Current Density,” pp, 1–4, 2003,
- [10] J, G, Gonzales, “Desenvolvimento e Aplicação de Sondas Inovadoras de Correntes Induzidas Para Ensaaios Não Destrutivos,” 2011,
- [11] NDT Resource Center, “Impedance,” *NDT Resour, Cent*,, p, 101709, 2017,
- [12] NDT Resource Center, “Display - Complex Impedance Plane (eddy scope),” pp, 2–4, 2017,
- [13] L, F, S, G, Rosado, “Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents,” no, November, 2009,
- [14] L, Bai, G, Y, Tian, A, Simm, S, Tian, and Y, Cheng, “Fast crack profile reconstruction using

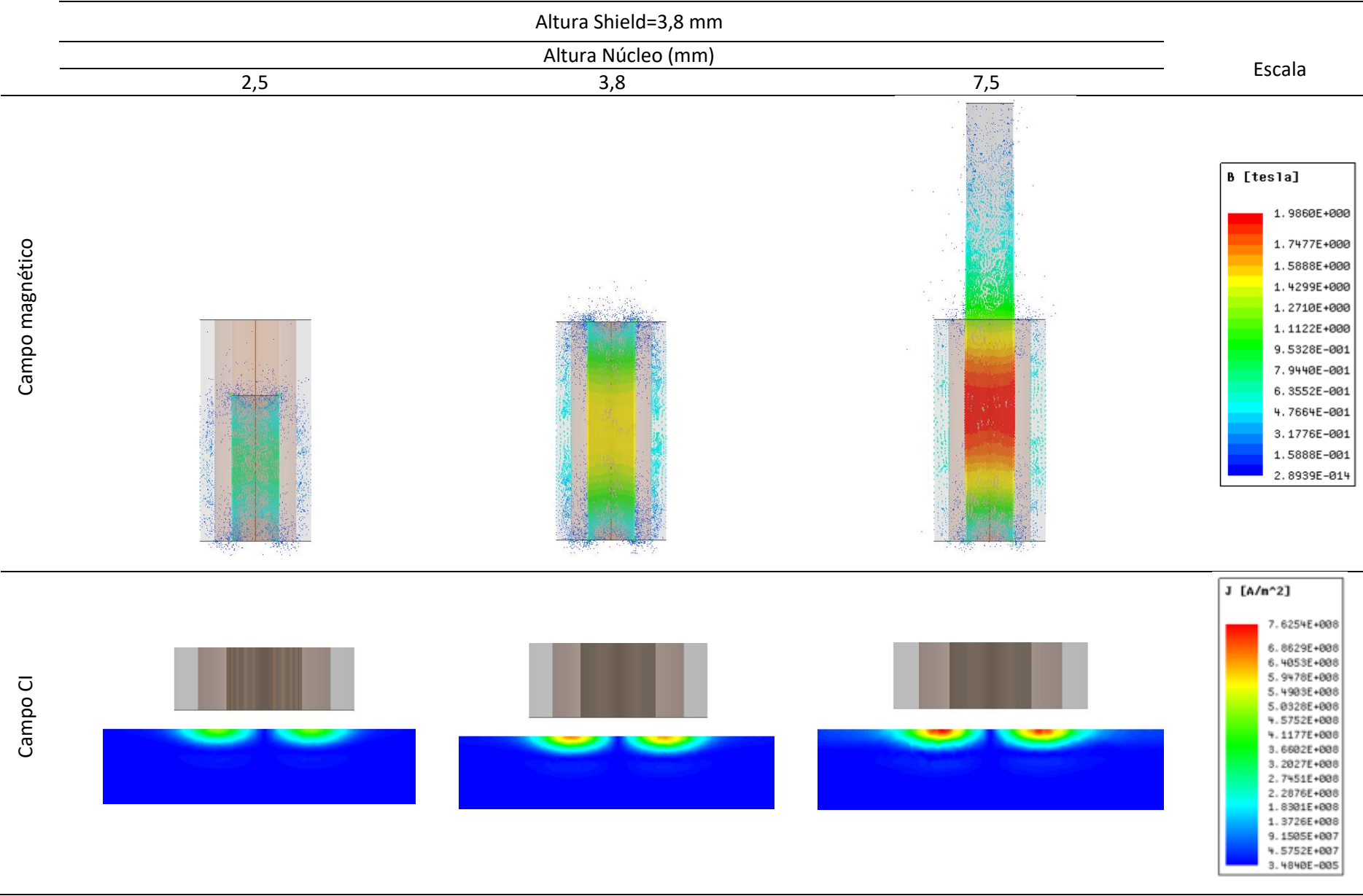
- pulsed eddy current signals,” *NDT E Int.*, vol, 54, pp, 37–44, 2013, doi: 10,1016/j.ndteint,2012,11,003,
- [15] F, D, Matos, “Desenvolvimento e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos para a Indústria Aeronáutica,” 2012,
- [16] Y, He, M, Pan, F, Luo, and G, Tian, “Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation,” *NDT E Int.*, vol, 44, no, 4, pp, 344–352, 2011, doi: 10,1016/j.ndteint,2011,01,009,
- [17] A, Sophian, G, Y, Tian, D, Taylor, and J, Rudlin, “A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT,” *NDT E Int.*, vol, 36, no, 1, pp, 37–41, 2003, doi: 10,1016/S0963-8695(02)00069-5,
- [18] L, Shu, H, Songling, Z, Wei, and Y, Peng, “Study of pulse eddy current probes detecting cracks extending in all directions,” *Sensors Actuators, A Phys.*, 2008, doi: 10,1016/j.sna,2007,07,008,
- [19] T, Santos, P, Vilaça, and L, Quintino, “Sondas de Correntes de Eddy para END : Funcionalidade e Aplicação à SFL,” 2008,
- [20] S, Frank, M, Ungers, and R, Rolser, “Coaxial control of aluminum and steel laser brazing processes,” in *Physics Procedia*, 2011, doi: 10,1016/j.phpro,2011,03,094,
- [21] D, Krishnaja, M, Cheepu, and D, Venkateswarlu, “A Review of Research Progress on Dissimilar Laser Weld-Brazing of Automotive Applications,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, doi: 10,1088/1757-899X/330/1/012073,
- [22] F, Klocke and S, Frank, “Surface deposits in laser brazing,” *Sci, Technol, Weld, Join.*, 2012, doi: 10,1179/1362171812Y,00000000075,
- [23] M, Ungers *et al.*, “In-situ quality monitoring during laser brazing,” in *Physics Procedia*, 2010, doi: 10,1016/j.phpro,2010,08,077,
- [24] D, R, Caicedo and S, J, Clark, “Clinical HyFlex[®] CM rotary files : an excellent innovation for endodontic treatment,” *Endod, Prac.*, vol, 4, no, 6, pp, 10–17, 2016,
- [25] S, Semaan, S, Fagundes, and B, Filho, “Endodontia mecanizada : a evolução dos sistemas rotatórios contínuos Mechanized endodontic : the evolution of continuous rotary systems,” 2009,

- [26] P, Bansode, M, B, Wavdhane, S, D, Pathak, S, B, Khedgikar, and H, Rana, “Evolution of Rotary Ni-Ti File Systems : A Literature Review,” no, 12, pp, 91–94, 2016,
- [27] B, Sattapan, G, J, Nervo, J, E, Palamara, and H, H, Messer, “Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use,,” *J, Endod,*, 2000, doi: 10,1097/00004770-200003000-00008,
- [28] G, Gambarini *et al,*, “Fatigue Resistance of New and Used Nickel-Titanium Rotary Instruments: a Comparative Study,” *Clin, Ter,*, vol, 169, no, 3, pp, e96–e101, 2018, doi: 10,7417/T,2018,2061,
- [29] A, Fernandes, “Caracterização do comportamento à fadiga de instrumentos de Ni-Ti para aplicações de endodontia,” 2013,
- [30] B, Peng, Y, Shen, G, S, P, Cheung, and T, J, Xia, “Defects in ProTaper S1 instruments after clinical use: Longitudinal examination,” *Int, Endod, J,*, vol, 38, no, 8, pp, 550–557, 2005, doi: 10,1111/j,1365-2591,2005,00991,x,
- [31] Contene, “A nova geração de limas NiTi HyFlex,” 2015, [Online], Available: https://www.coltene.com/fileadmin/Data/EN/Products/Endodontics/Root_Canal_Shaping/HyFlex_EDM/60019781_04-15_HyFlex_PT_2904.pdf,
- [32] M, R, Leonardo, *Tratamento de Canais Radiculares*, 2017,
- [33] Coltene®, “HyFlex CM & EDM,” [Online], Available: <https://www.coltene.com/pim/DOC/BRO/docbro6849-03-18-es-hyflex-cm-edm-a4sesaindv1.pdf>,
- [34] G, Bergenholtz, P, Hørsted-Bindslev, and C, Reit, “Root Canal Instrumentation,” in *Textbook of Edodontology*, ,
- [35] N, Yusa, W, Cheng, Z, Chen, and K, Miya, “Generalized neural network approach to eddy current inversion for real cracks,” *NDT E Int,*, 2002, doi: 10,1016/S0963-8695(02)00048-8,

ANEXO 1- INFLUÊNCIA DA ALTURA DO SHIELD NOS ENSAIOS DE CI



ANEXO 2- INFLUÊNCIA DA ALTURA DO NÚCLEO NOS ENSAIOS DE CI



ANEXO 3- INFLUÊNCIA DA MESMA ALTURA DO SHIELD E DO NÚCLEO NOS ENSAIOS DE CI,

